

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Tepelné stárnutí optického děliče
Thermal Ageing of the Optical Coupler**

2018

Bc. Jakub Křepelka

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jakub Křepelka

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Tepelné stárnutí optického děliče
Thermal Ageing of the Optical Coupler

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je zjistit vliv tepelného stárnutí při určité teplotě na útlumové parametry optického děliče. Tyto parametry jsou vložný útlum, zbytkový útlum, dělicí poměr, homegenita ztrát a útlum přeslechu (směrovost).

1. Teoretický rozbor optických sítí.
2. Teoretický popis optického děliče a jeho parametrů.
3. Popis tepelného stárnutí optického děliče.
4. Měření optického děliče během tepelného stárnutí.
5. Nalezení změnových charakteristik pro optické děliče vlivem tepelného stárnutí.
6. Vyhodnocení závěrů bodu 4 a 5.

Seznam doporučené odborné literatury:

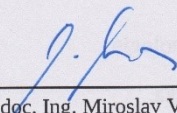
- [1] KARTALOPOULOS, Stamatios V. Introduction to DWDM technology: data in a rainbow. Bellingham, Wash.: SPIE Optical Engineering Press, c2000, xxii, 252 p. ISBN 0780353994.
- [2] DERICKSON, Dennis. Fiber optic test and measurement. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, c1998, xx, 642 p. ISBN 0135343305.
- [3] DUTTA K., Achyut a Masahiko FUJIWARA. WDM technologies: passive optical components. Amsterdam: Academic Press, c2003, xix, 513 s. ISBN 0122252624.
- [4] VENGHAUS, Herbert a Norbert GROTE. Fibre optic communication: key devices. New York: Springer, c2012, xxx, 680 p. Springer series in optical sciences, v. 161. ISBN 9783642205170.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal, Ph.D.**

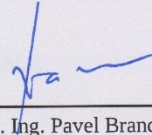
Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 25. dubna 2018

.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Janu Látalovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky, trpělivost a odbornou pomoc při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Adéle Vrtkové za poskytnutí odborné pomoci při statistickém vyhodnocování výsledků.

Abstrakt

Celá práce je zaměřena na pasivní optický rozbočovač, neboli coupler. Cílem práce je určit vliv tepelného stárnutí na útlumové parametry coupleru. V teoretické části jsou uvedeny základní informace související s problematikou coupleru. Praktická část se pak zabývá samotným měřením vlivu tepelného stárnutí na útlumové parametry coupleru. Podstatnými parametry celého měření jsou vložné útlumy, homogenita ztrát, celkové ztráty, dělicí poměry a směrovosti.

Klíčová slova

pasivní optická síť, coupler, optický rozbočovač, tepelné stárnutí

Abstract

The diploma thesis studies a passive optical splitter or coupler. The aim is to determine the effect of thermal thermal ageing on attenuation parameters of the coupler, theoretical analysis of device. The theoretical part provides basic information related to the issue coupler. The practical part deals with the measurements of the impact of thermal ageing on the attenuation parameters of the coupler. The essential parameters of the measurement are insertion loss, split ratio, total losses, homogeneity of the losses and directionalities.

Key words

passive optical network, coupler, optical splitter, thermal ageing

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 3 -
Seznam použitých zkratk.....	- 4 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	- 6 -
1 Úvod.....	- 1 -
2 Teoretický rozbor optických sítí	2
2.1 Rozdělení optických sítí.....	2
2.1.1 Aktivní optická síť (AON)	2
2.1.2 Pasivní optická síť (PON)	2
2.2 Topologie sítí	4
2.3 Optické přípojky	5
2.4 Standardy PON sítě.....	8
2.4.1 APON (ITU–T G.983.1)	8
2.4.2 BPON (ITU–T G.983.3).....	8
2.4.3 GPON (ITU–T G.984)	8
2.4.4 EPON (IEEE 802.3ah)	9
2.4.5 10G–EPON (IEEE 802.3av)	9
2.4.6 XG–PON (ITU–T G.987)	10
2.4.7 WDM–PON.....	11
2.5 Optická vlákna	12
2.6 Měření útlumů optických tras	16
3 Teoretický rozbor optického coupleru a jeho parametrů.....	20
4 Popis tepelného stárnutí optického děliče	23
4.1 Přenos tepla.....	24
4.2 Popis tepelného namáhání a měření couplerů	25
5 Měření optického děliče během tepelného stárnutí.....	27
5.1 Měření výkonu	27
5.2 Vložný útlum.....	27
5.2.1 Vložný útlum coupleru Optokon	28
5.2.2 Vložný útlum Gezhi	31
5.3 Celkové ztráty	36
5.3.1 Celkové ztráty coupleru Optokon.....	36

5.3.2	Celkové ztráty coupleru Gezhi	38
5.4	Homogenita ztrát.....	40
5.4.1	Homogenita ztrát Optokon	40
5.4.2	Homogenita ztrát Gezhi.....	42
5.5	Dělicí poměr.....	43
5.5.1	Dělicí poměr coupleru Optokon	44
5.5.2	Dělicí poměr coupleru Gezhi.....	48
5.6	Směrovost.....	51
5.6.1	Směrovost coupleru Optokon	52
5.6.2	Směrovost coupleru Gezhi	53
6	Nalezení změnových charakteristik pro optické děliče vlivem tepelného stárnutí	54
6.1	Optokon.....	54
6.2	Gezhi	57
7	Zhodnocení měření.....	61
7.1	Optokon.....	61
7.2	Gezhi	63
8	Závěr	66
	Použitá literatura	69
	Seznam příloh.....	71

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
A	dB	Decibel
F	Hz	Frekvence
P	W	Výkon
λ	nm	Vlnová délka

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AON	Active Optical Network
APON	ATM Passive Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BPON	Broadband PON
CO	Central Office
CWDM	Coarse WDM
DEMUX	Demultiplexor
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DWDM	Dense WDM
EPON	Ethernet PON
FBT	Fused Bionic Taper
FTTB	Fiber To The Building
FTTC	Fiber To The Curb
FTTEx	Fiber To The Exchange
FTTH	Fiber To The Home
FTTN	Fiber To The Node
FTTO	Fiber To The Office
FTTP	Fiber To The Premises
FTTx	Fiber To The x
FWM	Four Wave Mixing
GEM	GPON Encapsulation Method
GFP	Generic Framing Procedure
GI	Graded Index
GPON	Gigabit PON
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization

Seznam použitých zkratk

ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
MM	Multimode
MUX	Multiplexor
NT	Network Termination
OAN	Optical Access Network
ODN	Optical Distribution Network
OLT	Optical Line Termination
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
PLC	Planar Lightwave Circuit
PMMA	Polymethylmethakrylát
POF	Plastic Optical Fiber
PON	Passive Optical Network
P2P	Point-to-point
P2MP	Point-to-multipoint
SM	Singlemode
SNI	Service Node Interface
SI	Step Index
TDM	Time Division Multiplexing
UNI	User Network Interface
VDSL	Very high bit rate Digital Subscriber Line
WDM	Wavelength Division Multiplexing
10G-EPON	10Gigabit – Ethernet PON

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
2.1	Ukázka PON sítě s jednotkami OLT, ONU, ONT	4
2.2	Topologie typu sběrnice	4
2.3	Topologie typu kruh	4
2.4	Topologie typu hvězda	5
2.5	Topologie typu víceúrovňová hvězda	5
2.6	Ukázka FTTx optických přípojek	7
2.7	Ukázka optického rozvaděče	7
2.8	Princip fungování WDM	11
2.9	Kanály hrubého vlnového multiplexu (CWDM)	12
2.10	Ukázka jednovlnového vlákna	13
2.11	Ukázka mnohavlnového vlákna s gradientní změnou indexu lomu	13
2.12	Ukázka mnohavlnového vlákna se skokovou změnou indexu lomu	14
2.13	Přehled faktorů způsobující útlum	14
2.14	Ukázka měření dvou délek	16
2.15	Ukázka měření vložných ztrát metoda 1a	17
2.16	Ukázka měření vložných ztrát metoda 1b	17
2.17	Ukázka měření vložných ztrát metoda 1c	18
2.18	Ukázka OTDR výstupu	18
3.1	Výroba coupleru technologií FBT	19
3.2	Stavba PLC coupleru	20
4.1	Ukázka prostorově centrované (vlevo) a plošně centrované (vpravo) krychlové mřížky	22
4.2	Schéma zapojení měření výkonu u výstupu 5	24
4.3	Měřicí stanice	24
5.1	Vložné útlumy pro vlnovou délku 1310 nm (Optokon)	27
5.2	Krabicové grafy vložných útlumů pro vlnovou délku 1310 nm (Optokon)	28
5.3	Vložné útlumy pro vlnovou délku 1550 nm (Optokon)	29

5.4	Krabicové grafy vložných útlumů pro vlnovou délku 1550 nm (Optokon)	30
5.5	Vložné útlumy pro vlnovou délku 1310 nm (Gezhi)	31
5.6	Krabicové grafy vložných útlumů pro vlnovou délku 1310 nm (Gezhi)	32
5.7	Vložné útlumy pro vlnovou délku 1550 nm (Gezhi)	33
5.8	Krabicové grafy vložných útlumů pro vlnovou délku 1550 nm (Gezhi)	34
5.9	Celkové ztráty pro vlnové délky 1310 a 1550 nm (Optokon)	35
5.10	Krabicové grafy celkových ztrát (Optokon)	36
5.11	Celkové ztráty pro vlnové délky 1310 a 1550 nm (Gezhi)	37
5.12	Krabicové grafy celkových ztrát (Gezhi)	38
5.13	Homogenita ztrát pro vlnové délky 1310 a 1550 nm (Optokon)	39
5.14	Krabicové grafy homogenity ztrát (Optokon)	40
5.15	Homogenita ztrát pro vlnové délky 1310 a 1550 nm (Gezhi)	41
5.16	Krabicové grafy homogenity ztrát (Gezhi)	42
5.17	Dělicí poměry pro vlnovou délku 1310 nm (Optokon)	43
5.18	Krabicové grafy dělicích poměrů pro vlnovou délku 1310 nm (Optokon)	44
5.19	Dělicí poměry pro vlnovou délku 1550 nm (Optokon)	45
5.20	Krabicové grafy dělicích poměrů pro vlnovou délku 1550 nm (Optokon)	46
5.21	Dělicí poměry pro vlnovou délku 1310 nm (Gezhi)	47
5.22	Krabicové grafy dělicích poměrů pro vlnovou délku 1310 nm (Gezhi)	48
5.23	Dělicí poměry pro vlnovou délku 1550 nm (Gezhi)	49
5.24	Krabicové grafy dělicích poměrů pro vlnovou délku 1550 nm (Gezhi)	50
5.25	Schéma měření směrovosti mezi výstupy 2 a 5	51
6.1	Procentuální výsledky vložného útlumu pro 1310 nm	53
6.2	Procentuální výsledky vložného útlumu pro 1550 nm	54

6.3	Procentuální výsledky celkových ztrát	54
6.4	Procentuální výsledky homogenity ztrát	55
6.5	Procentuální výsledky dělicího poměru pro 1310 nm	55
6.6	Procentuální výsledky dělicího poměru pro 1550 nm	56
6.7	Procentuální výsledky vložného útlumu pro 1310 nm	56
6.8	Procentuální výsledky vložného útlumu pro 1550 nm	57
6.9	Procentuální výsledky celkových ztrát	57
6.10	Procentuální výsledky homogenity ztrát	58
6.11	Procentuální výsledky dělicího poměru pro 1310 nm	58
6.12	Procentuální výsledky dělicího poměru pro 1550 nm	59
7.1	Mechanické poškození vláken	62

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
3.1	Ukázka vložných útlumů PLC coupleru od firmy SQS vláknová optika	21
4.1	Coupler firmy Optokon	25
4.2	Coupler firmy Gezhi	25
5.1	Explorační analýza vložných útlumů pro vlnovou délku 1310 nm (Optokon)	28
5.2	Explorační analýza vložných útlumů pro vlnovou délku 1550 nm (Optokon)	30
5.3	Explorační analýza vložných útlumů pro vlnovou délku 1310 nm (Gezhi)	32
5.4	Explorační analýza vložných útlumů pro vlnovou délku 1550 nm (Gezhi)	34
5.5	Explorační analýza celkových ztrát (Optokon)	36
5.6	Explorační analýza celkových ztrát (Gezhi)	38
5.7	Explorační analýza homogenity ztrát (Optokon)	40
5.8	Explorační analýza homogenity ztrát (Gezhi)	41
5.9	Explorační analýza dělicích poměrů pro vlnovou délku 1310 nm (Optokon)	44
5.10	Explorační analýza dělicích poměrů pro vlnovou délku 1550 nm (Optokon)	46

5.11	Explorační analýza dělicích poměrů pro vlnovou délku 1310 nm (Gezhi)	48
5.12	Explorační analýza dělicích poměrů pro vlnovou délku 1550 nm (Gezhi)	49

1 Úvod

Optické sítě jsou v dnešní době velice rozšířenou variantou při poskytování internetového připojení ve firmách a domácnostech. Jsou však také využívány pro propojení měst, států a kontinentů. Mezi jejich největší pozitiva jsou řazeny velké přenosové rychlosti, vysoká spolehlivost a možnost překlenout velkou vzdálenost pomocí jednoho optického vlákna bez zesilovače. Obsahem diplomové práce je zkoumání coupleru, neboli optického rozbočovače, který je využíván v pasivních optických sítích. Cílem diplomové práce je určit vliv tepelného namáhání na útlumové parametry coupleru, včetně uvedení teoretického rozboru tohoto zařízení.

Celá práce je rozdělena na dvě hlavní části. Jedná se o část teoretickou, ve které jsou vypracovány první tři body zadání, a praktickou, kde je popsáno samotné měření, nalezení změnových charakteristik a vyhodnocení parametrů coupleru po tepelném namáhání.

Druhá kapitola je věnována úvodu do problematiky optických sítí. Konkrétně jsou zde uvedeny typy optických sítí, topologie, optické přípojky, standardy PON sítí a využívaná optická vlákna. V následující kapitole je uveden teoretický rozbor samotného coupleru, včetně jeho útlumových parametrů.

Obsahem čtvrté kapitoly je popis průběhu tepelného namáhání. Jsou zde definovány typy krystalických mřížek a způsoby přenosu tepla. Pátá kapitola je rozdělena na 6 podkapitol. První podkapitola je zaměřena na průběh měření výkonů vycházejících z coupleru. V následujících podkapitolách je následně pro každý zkoumaný parametr uveden způsob jeho výpočtu, průběh měření a naměřené výsledky. Celkově se jedná o 5 parametrů, a to vložný útlum, dělicí poměr, směrovost, celkové ztráty a homogenita ztrát.

Cílem šesté kapitoly je nalezení změnových charakteristik optických děličů vlivem tepelného stárnutí. U obou couplerů jsou srovnány průměrné výsledky jednotlivých parametrů po tepelném namáhání vůči jejich základnímu měření. Součástí je i grafické znázornění.

Poslední kapitola se zabývá celkovým zhodnocením měření. Je zde určen vliv tepelného namáhání na jednotlivé parametry coupleru.

Celkově proběhlo sedmdesát měření, jejichž realizace probíhala na VŠB. Ke zpracování dat byly použity programy Excel, Matlab a RKWard.

2 Teoretický rozbor optických sítí

Tato kapitola je zaměřena na teoretická východiska související s optickými sítěmi. Je zde uvedeno jejich základní rozdělení, přenosová média, optické přípojky i prvky, které se zde vyskytují. Kapitola je zakončena popisem útlumu a způsoby jeho měření.

2.1 Rozdělení optických sítí

Jedno z mnoha dělení optických sítí vychází z funkcí, které tyto sítě vykonávají v rámci jedné velké telekomunikační sítě. V tomto pojetí jsou známy páteřní, přístupové a lokální sítě. Hlavní funkce páteřní sítě spočívá v propojení centrálních uzlů na dlouhé vzdálenosti. Úlohou přístupových sítí je připojování cílových uživatelů k těmto uzlům (přepínače, směrovače a jiné). Jak již z názvu vyplývá, lokální sítě slouží ke spojení koncových stanic s přepínači a směrovači na lokální úrovni.

Dalším možným dělením je spektrum, ve kterém sítě pracují. Jedná se tedy o oblast viditelnou a neviditelnou. Nelze opomenout ani typ použitého přenosového média, na základě kterého jsou rozlišovány sítě vláknové a volným prostorem. Dále jsou optické sítě členěny na spoje typu bod-bod, jinak také označované jako P2P (Point-to-Point) a spoje mnohabodové P2MP (Point-to-MultiPoint). Samotnou optickou infrastrukturu lze pojmenovat jako Optickou distribuční síť (ODN – Optical Distribution Network), která se dělí na sítě PON (Passive Optical Network – pasivní optická síť) a AON (Active Optical Network – aktivní optická síť). Tyto sítě a jejich fungování jsou popsány v následujících podkapitolách [1], [2].

2.1.1 Aktivní optická síť (AON)

Tato síť neobsahuje v optické distribuční síti (ODN) zpravidla žádný pasivní prvek. Výjimku mohou představovat optická vlákna a děliče. Obecně je možné říci, že u zařízení v aktivních optických sítích je vyžadován management (řízení) a napájení. Mezi prvky této sítě jsou řazeny přepínače, zesilovače, aktivní odbočnice, směrovače či opakovače. Využití těchto sítí spočívá v topologiích bod-bod a v mnohabodové topologii. Vzdálenost mezi koncovým uživatelem a centrálním poskytovatelem telekomunikačních služeb (CO) může dosahovat až 80 km. Ve srovnání s pasivními optickými sítěmi se jedná o značnou výhodu, jelikož charakteristická vzdálenost pro pasivní sítě je většinou jen 10 až 20 km. Dalšími výhodami aktivní optické sítě jsou její aktivní prvky s možností správy, symetrický kanál a jednoduché zlepšování technologií. Mezi možné nevýhody této sítě lze řadit napájení jednotlivých prvků, použití vyššího množství spojek, konektorů či vláken a vyšší spotřebu energie [1], [2], [9].

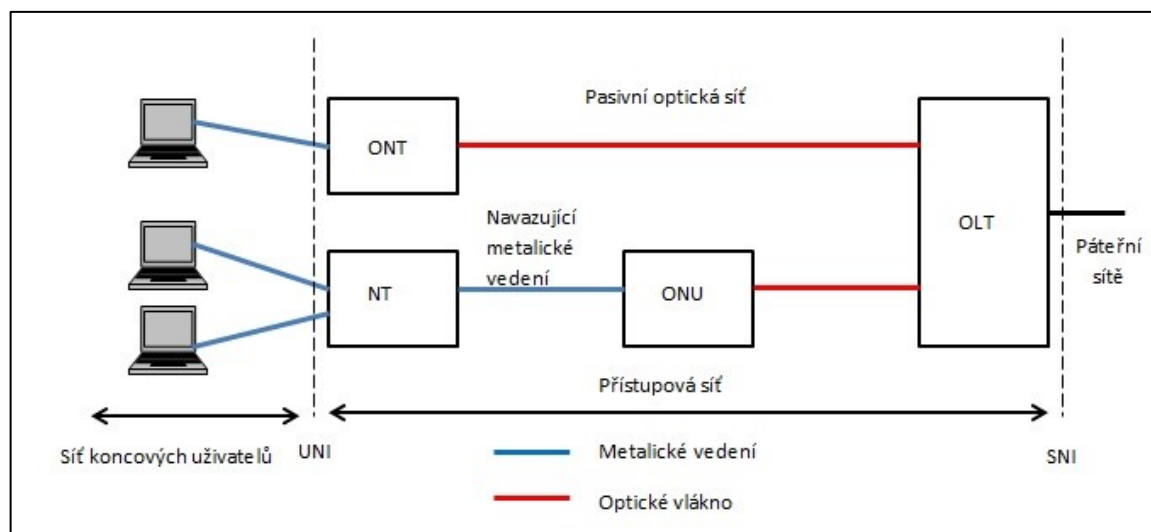
2.1.2 Pasivní optická síť (PON)

Pro tuto síť jsou charakteristické čistě pasivní prvky mezi poskytovatelem a uživatelem. Jinak řečeno, žádné ze zařízení na trase nepotřebuje správu ani napájení, což se projevuje v nízkých nákladech jak na výstavbu těchto sítí, tak na jejich provoz. Také dochází k úspoře počtu tažených vláken, protože se využívá sdílení přenosové šířky pro více účastníků sítě. Tato síťová architektura je používána v mnohabodových sítích (P2MP). Mezi prvky sítě jsou řazeny optické rozbočovače (couplery), splitters a vazební prvky. Teorii optických couplerů je detailněji věnována následující kapitola. V praxi je zapojení pasivní optické sítě provedeno tak, že od provozovatele je vedeno vlákno, které většinou pokračuje až na pozemek majitele či k patě domu. Toto vlákno je označováno zkratkou FTTB, FTTH.

Signál jen dělen pomocí optického rozbočovače (coupleru) a je dále šířen ke koncovým uživatelům. V této fázi je používán tzv. rozbočovací poměr, který závisí na počtu koncových účastníků. Poměr se udává například 1:2, a to tehdy, když je přiveden signál jedním vláknem a následně rozbočen ke dvěma zákazníkům. V praxi se však používá široká škála couplerů s rozbočovacím poměrem od 1:16 do 1:128. U rozbočovačů s velkým poměrem rozbočení je zapotřebí použití multiplexu pro přenos informací od uživatele. Nejčastěji využívaným multiplexem u PON sítí je TDM (Time–Division–Multiplexing) nebo WDM (Wavelength–Division–Multiplexing). Časový multiplex (TDM) zajišťuje, aby každý účastník měl definovaný přesně daný interval pro vysílání. Těmto intervalům se říká časové sloty (timeslots). Vlnový multiplex (WDM) pak multiplexuje více optických signálů do jednoho vlákna za použití různých vlnových délek, jinak řečeno za použití jiných barev signálu. Tímto způsobem je navýšena kapacita přenosového média pro obousměrný provoz v jednom vlákně. Multiplexování je v PON sítích zapotřebí hned z několika důvodů. Například ve směru od uživatele jsou optická vlákna spojována, proto je tedy zapotřebí využití TDM, aby každý uživatel mohl chvíli vysílat a aby v danou chvíli přicházela data pouze od jednoho. Kdyby tomu tak nebylo, mohlo by docházet k degradaci signálu či kolizím na trase. Mezi výhody PON sítě lze zařadit nižší cenu výstavby i provozu samotné sítě, jelikož obsahuje jen pasivní prvky, které nepotřebují management, což je velkou výhodou oproti aktivním sítím. Další výhody jsou větší spolehlivost, menší množství různých konektorů, spojek, svárů, optických vláken a také jednodušší připojení nového účastníka. Naopak nevýhodami jsou složitější řízení kvality služeb, omezená šířka přenosového kanálu a samotný dosah PON sítě, který je menší než síť AON. Mezi základní prvky PON sítě patří:

- Optická distribuční síť (ODN – Optical Distribution Network). Zde lze zařadit všechny prostředky a prvky sítě na trase mezi koncovými jednotkami. V PON sítích tedy ODN obsahuje pouze pasivní prvky, jako jsou optický rozbočovač, splitter a vazební prvky.
- Optická přístupová síť (OAN – Optical Access Network). Je to soubor ODN připojených k centrálnímu uzlu.
- Optické linkové zakončení (OLT – Optical Line Termination). Jedná se o rozhraní mezi přístupovou sítí a telekomunikačními sítěmi. Zakončuje ODN na straně operátora sítě PON (poskytovatel připojení).
- Optické síťové zakončení (ONT – Optical Network Termination). Toto koncové zařízení se nachází na straně účastníka. Zajišťuje přizpůsobování komunikačních protokolů mezi rozhraním a pasivní optickou sítí. ONT se používá jako opticko-metalický konvertor pro připojení uživatele, který využívá ethernetové médium.
- Optická síťová jednotka (ONU – Optical Network Unit). Stejně jako ONT se nachází na straně uživatele. Má podobné funkce jako ONT. Nicméně realizuje připojení prostřednictvím metalické sítě nebo bezdrátové sítě, zaopatřuje také funkce při přechodu mezi optickou a metalickou částí sítě. Většinou používá různé varianty FTTx přípojek.
- Rozhraní UNI (User Network Interface). Je to přechod mezi přístupovou sítí a lokální sítí.
- Rozhraní SNI (Service Node Interface). Hranice mezi přístupovou a pátevní sítí.

- Zakončení sítě (NT – Network Termination). Jedná se o síťové zakončení, lze jej nalézt na straně uživatele [1], [2], [9].

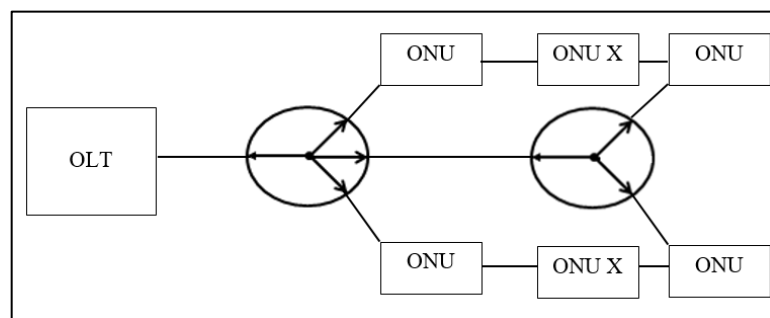


Obrázek 2.1: Ukázka PON sítě s jednotkami OLT, ONU, ONT [1]

2.2 Topologie sítí

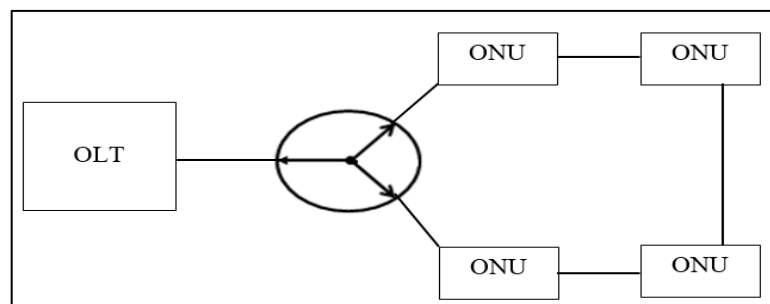
Obsahem této kapitoly je znázornění topologií, jež jsou využívány v optických distribučních sítích. Na následujících obrázcích lze tedy postupně vidět topologie typu sběrnice, kruhu, hvězdy a vícestupňové hvězdy.

Topologie typu sběrnice je podobná ethernetu, využívá se hojně ve školních sítích a na univerzitách.



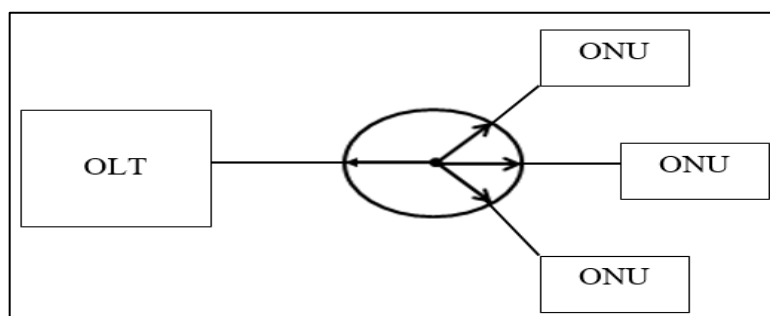
Obrázek 2.2: Topologie typu sběrnice

Kruhová topologie se ve většině případů využívá ve firemních sítích, jelikož odděluje vnější síť od vnitřní a zároveň zajišťuje spojení mezi jednotlivými uživateli.

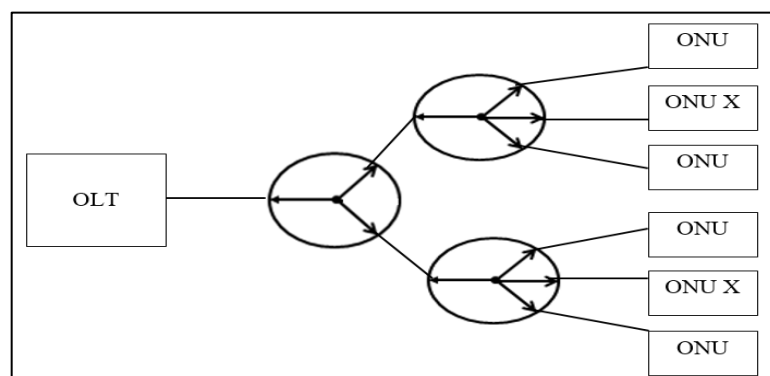


Obrázek 2.3: Topologie typu kruh

Topologie typu hvězda a víceúrovňová hvězda se nepoužívá až tak často. V praxi se z těchto dvou používá častěji víceúrovňová hvězda, která se využívá především k připojení domácností [1].



Obrázek 2.4: Topologie typu hvězda



Obrázek 2.5: Topologie typu víceúrovňová hvězda

2.3 Optické přípojky

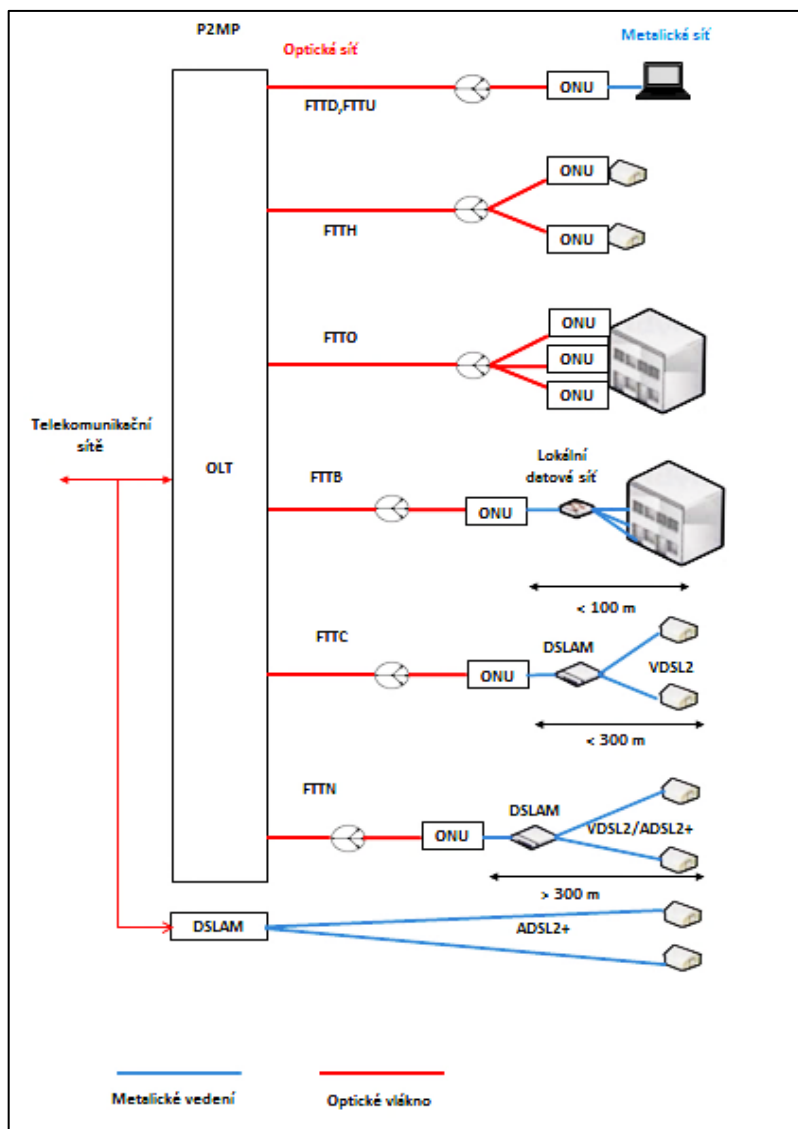
Optické přípojky jsou známy pod zkratkou FTTx, tedy tzv. Fiber To The x. Překlad tohoto spojení zní „vlákno do x“. Právě písmeno x je označením místa, kde dochází k přechodu z optické na metalickou síť. Tyto optické přípojky lze rozdělit na optické, opticko-metalické a opticko-radiové. Do optických jsou řazeny přípojky typu FTTH a FTTO a do opticko-metalických FTTB, FTTC a FTTN. Jejich podrobnější popis je uveden níže. Hlavní myšlenkou přípojek je zajištění vysoké přenosové rychlosti ke koncovým bodům, přístupu ke službám a zprostředkování hlasové služby pomocí jednoho vlákna. Grafickou ukázkou všech FTTx přípojek je možné vidět na obrázku 2.6.

Jednotlivé druhy optických přípojek:

- FTTH: Home – vlákno je přivedeno až do bytu ke koncovému uživateli, kde je ukončeno v účastnické zásuvce. Zákazníkovi je umožněno připojení vlastní kabeláže,

popřípadě zapojení vlastní sítě. Je zde velká výhoda přivedení optické trasy až do bytu a tedy plné využití přenosové rychlosti. Ačkoliv je tato varianta z finančního hlediska nejnáročnější, nabízí svým zákazníkům asymetrický režim, kdy má sestupný směr (downstream) vyšší přenosovou rychlost než vzestupný směr (upstream).

- FTTO: Office – vlákno je v tomto případě zakončeno v prostorách, kterými jsou kanceláře, školy, nemocnice, obchodní a průmyslové zóny, datová centra, aj. V tomto případě jsou zapotřebí jiné přenosové parametry, a proto se zde využívá symetrický režim. Uvedené instituce vyžadují velkou spolehlivost sítě, rychlou odezvu a zabránění výpadků sítě. Ty je potřeba u přípojky FTTO zajistit.
- FTTB: Building – tato varianta je používána nejčastěji. Vlákno je přivedeno k „patě“ domu, popřípadě do prostor k tomu určených. Většinou se jedná o sklepní prostory, kde se nachází optická síťová jednotka ONU nebo síťové zakončení ONT. V tomto místě je optická síť ukončena. Dále pokračuje síť vnitřní, která bývá řešena metalicky nebo bezdrátově, což se odvíjí od velikosti budovy. U starších i novějších staveb se s tímto řešením zpravidla počítá, a proto je v prostorách budov položena metalická kabeláž, která je vyvedena do suterénu a zde je připojena na síť optickou.
- FTTC: Curb – u této přípojky jsou vlákna přivedena k rozvaděči, který se nachází na sídlištích. Vzdálenost od koncových uživatelů je tedy vyšší, než u předchozích příkladů. Od tohoto rozvaděče je síť řešena metalicky. Rozvaděč se v tomto případě nachází venku, a proto je zapotřebí zajistit jejich velkou odolnost z pohledu klimatických změn počasí i činnosti člověka (vandalismus). Připojení poté bývá realizováno pomocí DSLAMu, který je připojen k jednotce ONU. Následně jsou využívány již zmíněné metalické rozvody.
- FTTN: Node – v překladu uzel. I pro tento typ optické přípojky je charakteristická vyšší vzdálenost rozvaděče od koncových uživatelů. Rozvaděč je opět umístěn ve venkovním prostředí, přičemž vzdálenost od koncového uživatele dosahuje v praxi více než 300 m. Do jednotky ONU je připojen prostřednictvím DSLAMu a síť je následně řešena metalicky. Jsou zde používány VDSL2 a ADSL2+.
- FTTEx: Exchange – někdy označováno jako ústředna. Optické vlákno je přivedeno do této ústředny a odtud je k zákazníkům vedeno klasické metalické vedení.
- FTTP: Premises – je souhrnné označení pro optické přípojky FTTH a FTTO, které již byly popsány výše [1], [2], [7], [18].



Obrázek 2.6: Ukázka FTTx optických přípojek [1]



Obrázek 2.7: Ukázka optického rozvaděče [18]

2.4 Standardy PON sítě

V této podkapitole jsou popsány standardy pasivních optických sítí. Mezi tyto normy patří APON, BPON, GPON, EPON, 10G-EPON, XG-PON, WDM-PON.

2.4.1 APON (ITU-T G.983.1)

Jedná se o první standard, který byl vyvinut v roce 1998. Zkratka APON značí ATM Passive Optical Network a využívá technologii buňkového přenosu ATM (Asynchronous Transfer Mode). U sítě APON jsou definované přenosové rychlosti ve dvou módech. První režim je symetrický. To znamená, že v obou směrech (upstream/downstream) dosahuje stejných přenosových rychlostí ve výši 155,52 Mbit/s. U asymetrického režimu jsou rychlosti rozdílné. Pro downstream je charakteristická rychlost 622,08 Mbit/s a upstream má rychlost 155,52 Mbit/s. Vlnové délky, které se zde používají, jsou 1480–1580 nm pro sestupný směr a 1260–1360 nm u vzestupného směru. Dosah této normy je do 20 km. Maximální rozbočovací poměr je u této sítě 1:32 (nejvyšší počet koncových jednotek ONU, ONT), přičemž u OLT může být až 1:64. V základních vlastnostech této sítě lze nalézt i útlumové třídy. U sítě APON se jedná o Třidu B (10–25 dB) a Třidu C (15–30 dB). Třída B je nejčastěji využívána pro ODN, která disponuje střední hodnotou útlumu. Třída C je používána zejména pro aplikace BPON sítí, kdy je potřeba překlenout vysokou hodnotu útlumu [1], [2], [9].

2.4.2 BPON (ITU-T G.983.3)

Broadband PON, který vychází z normy APON, vznikl v roce 2001. Představuje pouze rozšíření normy APON a není příliš používán. V BPON síti je pracováno se symetrickým režimem o rychlosti 622,08 Mbit/s v obou směrech. V roce 2003 byl vydán doplněk pro tuto síť, který zajistil navýšení přenosové rychlosti ve směru sestupném až na hodnotu 1244,16 Mbit/s. V těchto sítích jsou využívána jednovláknová vlákna (standard G.652) v obou směrech. Lze použít i jedno optické vlákno s vlnovým multiplexem (WDM). Jsou zde opět využity vlnové délky 1480–1500 nm nebo 1480–1580 nm pro sestupný směr a 1260–1360 nm a 1280–1350 nm pro směr vzestupný. Maximální počet koncových uživatelů je 32 a rozbočovací poměr je tedy 1:32, přičemž dosah je rovněž do 20 km. U sítí typu BPON jsou útlumové třídy ODN stejné (tj. Třída B a Třída C). Pouze byla přidána Třída A (5–20 dB), která se vyznačuje krátkou překlenutelnou vzdáleností a nízkým dělicím poměrem. Je tedy určena pro ODN s nízkým útlumem [1], [2], [9].

2.4.3 GPON (ITU-T G.984)

Síť GPON vychází z normy G.983.3, která byla vyvinuta v roce 2003. Jedná se o rozšíření v podobě nasazení vyšších rychlostí. Přenosová rychlost ve vzestupném směru (od koncových uživatelů) je 1,244 nebo 2,488 Gbit/s. Ve směru sestupném (ke koncovým uživatelům) se jedná o hodnotu 1,244 nebo 2,488 Gbit/s, což odpovídá symetrickému režimu. V režimu asymetrickém jsou rychlosti pro downstream 2,488 Gbit/s a upstream 1,244 Gbit/s. U sítě GPON je přenos uskutečňován v přirozeném tvaru, data není potřeba zapouzdřovat do ATM buněk. To umožňuje využití protokolu pro tvorbu rámců GFP (Generic Framing Procedure), který se vyznačuje svou značnou jednoduchostí. Předávání provozu se děje metodou GEM (GPON Encapsulation Method) nebo na základě ATM buněk. Metoda GEM využívá u přenosu přes síť GPON proměnlivou délku rámců. Vlnová délka v sestupném směru je stejná jako u předchozích standardů, tj. 1480–1500 nm. U vzestupného směru jsou možné

2 varianty, první 1260–1360 nm a druhá 1290–1330 nm. S uvedením GPON sítí došlo ke zvýšení maximálního počtu koncových uživatelů v rámci jedné optické distribuční sítě. Ve verzi z roku 2003 se jednalo o 64 uživatelů (maximální rozbočovací poměr 1:64). Následně byla přidána možnost až pro 128 koncových uživatelů, která je využívána nejčastěji. Základní verze sítí GPON disponuje logickým dosahem 60 km a fyzický 20 km. U GPON sítí s tzv. prodlouženým dosahem je však fyzický dosah ve dvou variantách, a to 40 nebo 60 km. Pro tyto varianty poté byly vytvořeny dvě nové útlumové třídy, Třída B+ (13–28 dB) a Třída C+ (17–32 dB).

Třída B+ je využívána pro maximální fyzický dosah 40 km a nachází se mezi původními třídami B a C. Dosah Třídy C+ činí 60 km. Díky zdokonalování parametrů optických komponentů lze využít nových optických prvků pro vyšší překlenutelný útlum. Třída C+ navyšuje hodnoty minimálního a maximálního překlenutelného útlumu třídy C. Tyto nové třídy byly definovány pouze pro asymetrický režim sítí GPON. Jejich přenosová rychlost je 2448,32 Mbit/s v sestupném směru a 1244,16 Mbit/s ve vzestupném směru [1], [2], [9], [12], [13].

2.4.4 EPON (IEEE 802.3ah)

V roce 2004 byla vyvinuta norma EPON, neboli Ethernet PON. Dalším možným označením je EPON jako Ethernet v první míli. Tento standard používá technologii Ethernet na spojové vrstvě, disponuje vyššími rychlostmi, jednoduchostí při připojení na lokální síť a rozšiřitelností sítě. Patří do rodiny standardů IEEE a lze ho označit za konkurenta unie ITU-T a jejich variant sítí APON, BPON a GPON. Standard EPON je oblíben z hlediska použitého protokolu Ethernet, který proniká do přístupových i páteřních sítí. Velkou výhodou tohoto standardu je, že značná část uživatelů a firem řeší své lokální síť LAN za pomoci Ethernetu. V sítích EPON není tedy potřeba provádět konverze protokolů a zapouzdření dat pro jejich následný přenos optickou sítí. To šetří nejen prostředky, ale také zjednodušuje návrh i realizaci koncových jednotek ONU, ONT a centrální jednotky OLT. Jsou zde i nevýhody, a to původní určení pro lokální síť a orientace na jednoduché datové přenosy. Prvotní podoba sítě EPON nenabízela žádné možnosti pro zajištění kvality služeb, synchronizaci, garanci zpoždění a kolísání. To je pak velmi výrazným negativním jevem při přenosu multimediálních dat v reálném čase. Postupným vylepšováním však došlo ke zlepšení některých z těchto mechanismů. Přenos v sítích EPON je uskutečněn v symetrickém režimu o rychlosti 1,25 Gbit/s. Síť disponuje dvěma typy připojení, EPON typ 1 (1000BASE – PX10) a EPON typ 2 (1000BASE – PX20). U EPON typ 1 je nejvyšší počet koncových uživatelů 16, tedy maximální rozbočovací poměr 1:16 a maximální dosah je pouze 10 km. EPON typ 2 umožňuje maximální počet koncových uživatelů 32, což odpovídá maximálnímu rozbočovacímu poměru 1:32. Dosažitelná vzdálenost je v tomto případě 20 km. Vlnová délka činí 1480–1500 nm pro sestupný směr a 1260–1360 nm pro vzestupný směr. Každý typ této sítě má definovanou pouze jednu útlumovou třídu. Název útlumové třídy pro EPON typ1 zní Typ 1 a dosahuje hodnot 5–20 dB. U EPON typ2 se jedná o útlumovou třídu Typ 2 a její specifická hodnota činí 10–24 dB [1], [2], [9], [11], [13].

2.4.5 10G–EPON (IEEE 802.3av)

Tato norma byla schválena roku 2009 a vydána pod označením IEEE 802.3av. 10G–EPON je zkratka pro 10Gigabit – Ethernet PON. Stejně jako v předchozí normě je zde využíváno Ethernetového rámce a zachování kompatibility. Dosahuje dvou variant, a to symetrického a asymetrického režimu. Symetrický režim je označován jako 10GBASE–PR a jeho rychlost přenosu v obou směrech je

10,3125 Gbit/s. Asymetrický režim je znám pod názvem 10/1GBASE-PRX a disponuje rychlostmi 10,3125 Gbit/s v sestupném směru a 1,25 Gbit/s ve vzestupném směru. Pro sestupný směr je tedy u obou variant využíváno stejné přenosové rychlosti, a to 10,3125 Gbit/s. Pásmo vlnových délek pro sestupný směr je také u obou variant shodné, a to v rozmezí 1575–1580 nm. U vzestupného směru je pásmo vlnových délek pro každou variantu rozdílné. Zatímco pro variantu 10GBASE-PR je pásmo v rozmezí 1260–1280 nm, u varianty 10/1GBASE-PRX je rovno 1260–1360 nm. Aby mohly koexistovat standardy EPON a 10G-EPON se stejnou vlnovou délkou u vzestupného směru, bylo nutné standardy od sebe oddělit. K tomu bylo využito oddělení optických signálů pomocí TDM.

Jak již bylo zmíněno, varianta 10/1GBASE-PRX využívá pásmo 1260–1360 nm. To bylo vyhrazené pro EPON z důvodu postupného přechodu k normám 10G-EPON. V sestupném směru bylo řešením zvolení odlišného pásma vlnových délek oproti normě EPON. Dosah sítě a rozbočovací poměr jsou zde závislé na trojici útlumových tříd. Pro variantu 10GBASE-PR jsou třídy označeny jako PR10, PR20 a PR30 a u varianty 10/1GBASE-PRX jako PRX10, PRX20 a PRX30. V rámci nízkého překlenutého útlumu je u variant PR10 a PRX10 stanoven maximální dosah do 10 km a rozbočovací poměr je 1:16. Dosah sítě u středního překlenutelného útlumu pro varianty PR20 a PRX20 je závislý na rozbočovacím poměru. V případě rozbočovacího poměru 1:32 je nejvyšší překlenutelná vzdálenost do 10 km. Snížením tohoto poměru na 1:16 dojde ke zvýšení maximální překlenutelné vzdálenosti až do 20 km. U varianty pro vysoký překlenutelný útlum se maximální vzdálenost pro PR30 a PRX30 pohybuje do 20 km při rozbočovacím poměru 1:32. U normy 10G-EPON je možné překlenutelnou vzdálenost navýšit prostřednictvím snížení rozbočovacího poměru. Tento způsob funguje i obráceně. Zvýšením maximálního rozbočovacího poměru dojde ke snížení maximální vzdálenosti [1], [2], [9], [10].

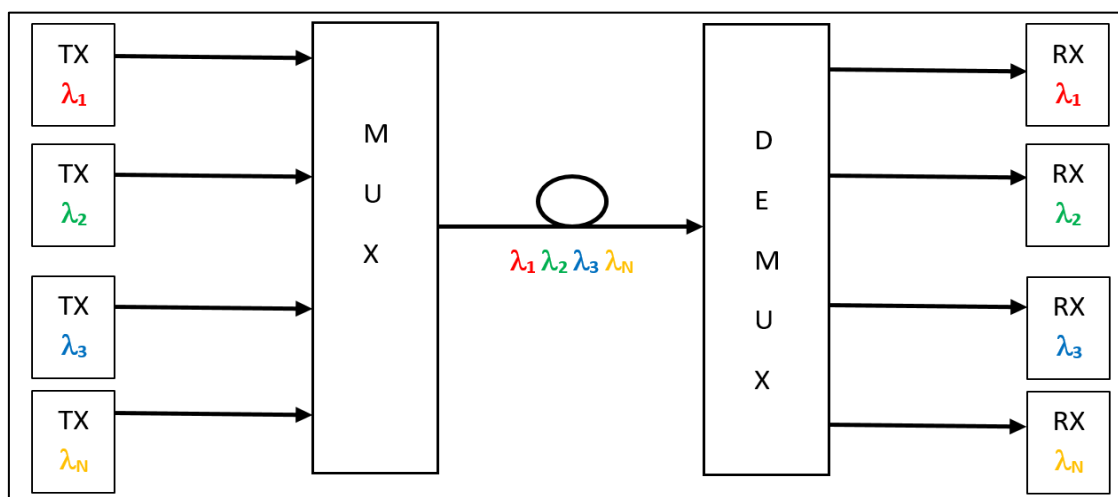
2.4.6 XG-PON (ITU-T G.987)

Tento standard byl vydán v roce 2010 a jeho přenosová rychlost činí 10 Gbit/s. Norma je kompatibilní s předchozí verzí GPON, jelikož nedošlo k velkým úpravám a přestavbě sítě. To umožňuje její nasazení v rámci společné optické distribuční sítě. Dělí se na dvě normy, které jsou označovány jako XG-PON1 a XG-PON2. XG-PON1 je představitelem normy XG-PON, zatímco norma XG-PON2 je prozatím ve vývoji. Hlavním rozdílem mezi XG-PON1 a XG-PON2 je jejich přenosová rychlost. Pro variantu XG-PON1 je tato rychlost ve vzestupném směru 2,48832 Gbit/s a v sestupném směru je to 9,95328 Gbit/s. U XG-PON2 se jedná o rychlost 9,95328 Gbit/s v obou směrech. Aby byla zajištěna kompatibilita a také bezproblémový přechod ze sítě GPON na XG-PON, bylo nutné zvolit vhodná pásma vlnových délek. Pásmo vlnových délek pro sestupný směr je tedy v rozmezí 1575–1580 nm a pro směr vzestupný 1260–1280 nm. Z důvodů vzájemné koexistence sítě GPON a XG-PON bylo zapotřebí separovat vlnové délky u obou variant za pomoci WDM. Avšak později bylo u normy GPON pozměněno pásmo vlnových délek ve vzestupném směru z délek 1260–1360 nm na 1290–1330 nm. Maximální dosah sítě XG-PON je 20, popřípadě 40 km. Tento dosah lze prodloužit podobným způsobem jako u GPON sítě. Jedná se o tzv. síť s prodlouženým dosahem, které mohou dosahovat vzdálenosti až 60 km. Rozbočovací poměr (maximální počet koncových uživatelů) je v aktuální verzi 1:64, tedy až 64 koncových uživatelů. Do budoucna je však počítáno s nárůstem rozbočovacího poměru až na 1:128, perspektivně 1:256. I v této normě lze nalézt útlumové třídy, které jsou rozděleny do dvou dvojic. V první dvojici je Nominal1 (14–29 dB) a Nominal2 (16–31 dB). Do druhé dvojice jsou řazeny

Extended1 (18–33 dB) a Extended2 (20–35 dB). V standardu XG-PON je využíván přístup TDMA (Time-Division-Multiple-Access – metoda přístupu ke sdílenému médiu) [1], [10].

2.4.7 WDM-PON

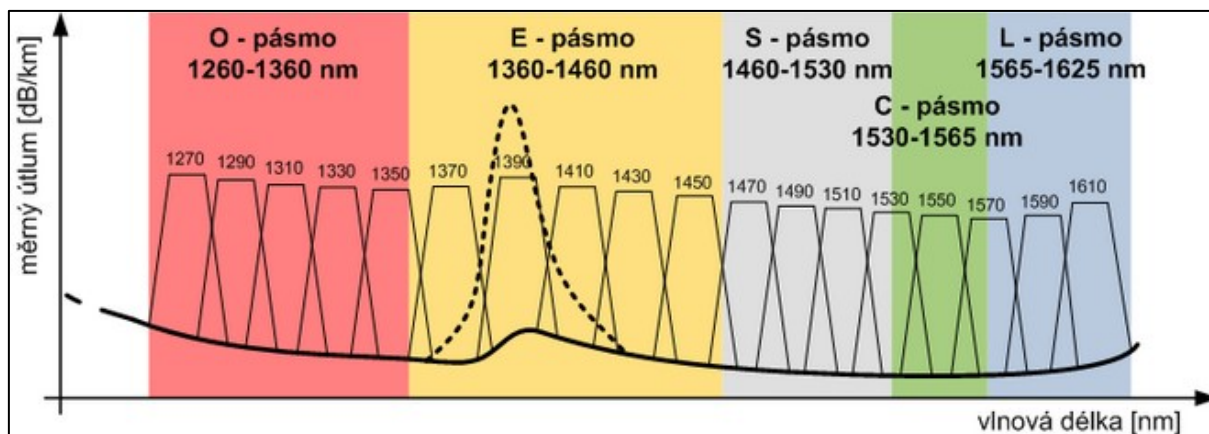
Technologie WDM, neboli vlnový multiplex, byl navržen roku 1970. Umožňuje přenášení informací za pomoci jednoho optického vlákna. Jednotlivé informace jsou navzájem odděleny vlnovou délkou, čímž dochází k navýšení přenosové kapacity. Zkratka WDM-PON je složeninou dvou slov, a to vlnového multiplexu a pasivní optické sítě (Wavelength-Division-Multiplexing-Passive-Optical-Network). V současnosti jsou systémy WDM běžně využívány na páteřních sítích a jsou složeny z optických zdrojů a detektorů. Princip fungování je jednoduchý. Přenášený signál je namodulován ve vysílači na danou použitou vlnovou délku a následně jsou v multiplexoru (MUX) sdruženy všechny použité vlnové délky do jednoho společného optického vlákna. Po průchodu sítí jsou signály rozděleny pomocí demultiplexoru (DEMUX) na jednotlivé vlnové délky. Grafické znázornění systému WDM lze vidět na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Princip fungování WDM

U vlnového multiplexu existují dvě metody. První je CWDM (Coarse WDM, označována jako standard ITU-T G.694.2) a druhá DWDM (Dense WDM, označována jako standard ITU-T G.694.1). CDWM je představitelem hrubého vlnového multiplexu a DWDM je ukazatelem hustého vlnového multiplexu. Jednotlivé kanály u CDWM jsou v rozestupu 20 nm. První nosný kanál je na vlnové délce 1270 nm a poslední kanál na 1610 nm. Pro jednovidové vlákno je definováno 18 kanálů, které jsou rozděleny do jednotlivých pásem (viz obrázek 2.9.)

U hustého vlnového multiplexu (DWDM) je využíváno menšího rozestupu mezi kanály, a proto lze v jednom pásmu zaznamenat 32, 64 nebo 96 vlnových délek. Pokud je využito DWDM v pasivních přístupových sítích, pak je u pásem C a L dosaženo rozteče nosných 0,8 nm. To umožňuje přenos 32 až 80 vlnových délek. Na páteřních sítích jsou využívány pásma C, L a S, kde je rozteč 0,4 nm a lze použít 80 až 160 nosných v optickém vlákne [1], [2], [8].



Obrázek 2.9: Kanály hrubého vlnového multiplexu (CWD) [8]

2.5 Optická vlákna

Tato kapitola je věnována optickým vláknům, která jsou používána v telekomunikacích a slouží jako náhrada za metalickou kabeláž. Výhoda optických vláken oproti metalické kabeláži spočívá především v přenosu signálů s menší ztrátou, imunitě vůči elektromagnetickému záření, přenosu na velké vzdálenosti, nemožnosti odposlouchávat přenosy, velké životnosti a zejména vysoké přenosové rychlosti. Ta může dosahovat řádů gigabitů za sekundu, popřípadě terabitů za sekundu. Vlákná jsou rozdělována podle typu použitého materiálu na vlákna skleněná a vlákna plastová (označované jako POF – Plastic Optical Fiber). Skleněná vlákna jsou nejčastěji vyráběná z křemenného skla (SiO_2), nicméně druh aplikovaného skla se může lišit. U plastových vláken je používána sloučenina polymethylmethakrylátu (PMMA), známého také jako plexisklo. Obložení jádra je například z polymeru fluoru. Plastová vlákna jsou ve většině případů využívána k překlenutí kratší vzdálenosti, a to z důvodu většího útlumu oproti vláknům skleněným. Toto vlákno dosahuje v mnohavidovém režimu útlumu od 50 do 100 dB/km, zatímco u skleněných vláken je tato hodnota pouze okolo 1 dB/km. Vlákná jsou dále rozdělována na jednovidová (singlemode – SM) a mnohavidová (multimode – MM). Pro zjištění, zda je vlákno jednovidové či mnohavidové, je zapotřebí splnění podmínky, kterou udává normalizovaná frekvence. Splnění podmínky je ověřeno prostřednictvím dvou jednoduchých rovnic, a to rovnice pro výpočet numerické apertury a normalizované frekvence (viz vzorec 2.1 a 2.2).

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.1)$$

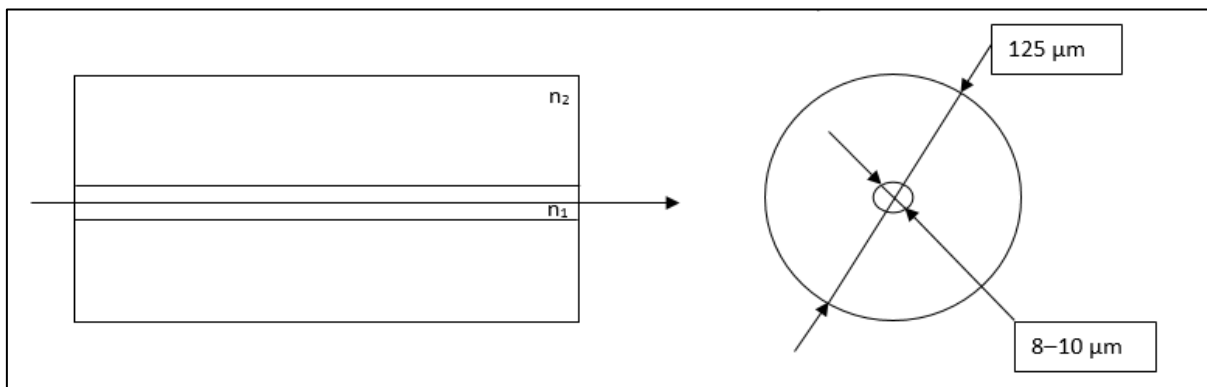
Kde n_1 je index lomu jádra a n_2 je index lomu pláště. Numerická apertura (NA) je bezrozměrná veličina. Dalším krokem je rovnice pro výpočet normalizované frekvence.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \times a \times NA \quad (2.2)$$

V rovnici pro výpočet normalizované frekvence je tato proměnná označována jako V . Dalšími parametry je λ , tedy vlnová délka, a je průměr jádra optického vlákna a NA jeho numerická apertura. Pokud je normalizovaná frekvence $V \leq 2,405$ pak je vlákno jednovidové. V opačném případě se jedná o vlákno mnohavidové.

Jednovidová vlákna (viz obrázek 2.10) jsou využívána pro překlenutí delších vzdáleností, tj. mezi městy, státy a kontinenty. Útlum u těchto vláken je v rozmezí 0,2–0,35 dB/km. Pro vlnovou délku 1310 nm se jedná o 0,35 dB/km a u 1550 nm vykazuje hodnotu 0,2 dB/km. Bez využití zesilovače lze

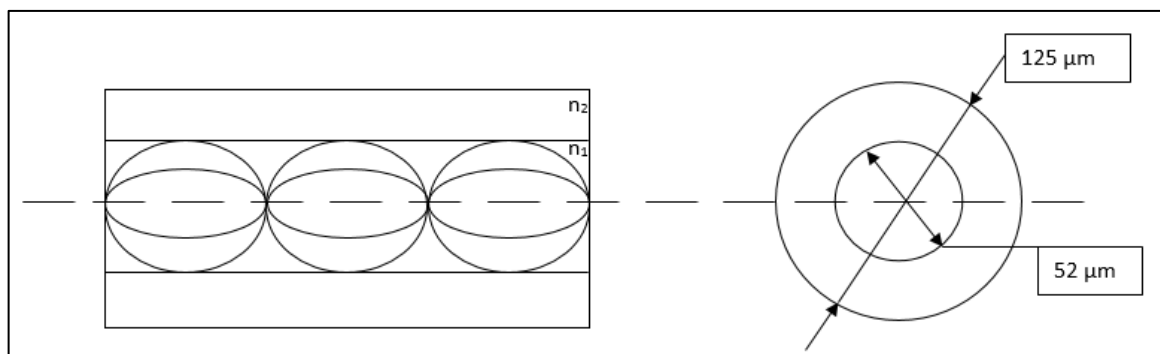
tímto vláknem propojit například trasu mezi Ostravou s Brnem. Rozsah šířky pásma je v řádu stovek GHz/km a jejich přenosová rychlost dosahuje až desítek Tbit/s. Tato rychlost je závislá i na použitém zdroji záření. Aby bylo možné vést optický paprsek jádrem, je nutné splnit podmínku $n_1 > n_2$. Jak již bylo výše psáno, n_1 představuje index lomu jádra optického vlákna a n_2 je ukazatelem indexu lomu pláště. Průměr jádra je v rozsahu 8–10 μm a průměr vlákna 125 μm . Standardní velikost primární ochrany je 250 μm nebo 500 μm a spolu s použitím těsné sekundární ochrany je průměr vlákna 900 μm .



Obrázek 2.10: Ukázka jednovidového vlákna

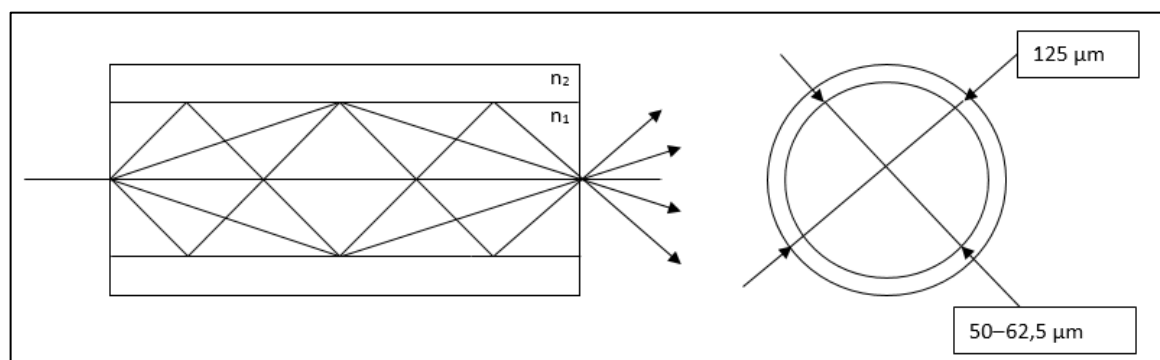
Mnohavidová vlákna jsou používána na kratší vzdálenosti. Je možné se setkat i s uváděnou hodnotou vzdálenosti do 3 km. Tato vlákna se zpravidla vyskytují ve firemních areálech a budovách. Jejich přenosová rychlost je nižší, a to od 10 Mbit/s do 10 Gbit/s. Mnohavidová vlákna se dále rozdělují na dvě podkategorie, a to vlákna se skokovou změnou indexu lomu (Step Index – SI) a vlákna s gradientní změnou indexu lomu (Graded Index – GI).

Mnohavidová vlákna s gradientní změnou indexu lomu (viz Obrázek 2.11) představují alternativu jednovidových vláken. Jejich útlum je ve srovnání s vlákny se skokovou změnou indexu lomu nižší, a to v rozsahu 2–10 dB/km. Šířka pásma je v rozpětí 300 MHz/km–1,5 GHz/km. Mezi výhody těchto vláken lze řadit jejich cenu, která je nižší než u jednovidových vláken, a také eliminace vidové disperze. Typickým rysem mnohavidového vlákna je jeho širší jádro. V porovnání s jednovidovým vláknem je rozdíl mezi jádry velice markantní. Jádra u mnohavidových vláken se pohybují v rozpětí 50–100 μm , zatímco u jednovidových se jedná pouze o hodnotu 8–10 μm . V praxi jsou nejčastěji využívány vlákna s jádrem 50 μm nebo 62,5 μm . I v tomto případě je využito primární ochrany a sekundární ochrany. Průměry těchto vrstev jsou totožné s rozměry jednovidových vláken. Charakteristickou vlastností je pozvolnější přechod mezi indexem lomu jádra a indexem lomu pláště. U těchto vláken je tento přechod reprezentován jako $n_1 > n_2 > n_3 > \dots > n_n$. Z obrázku 2.11 je patrné postupné zalamování šířícího se paprsku ve vlákně.



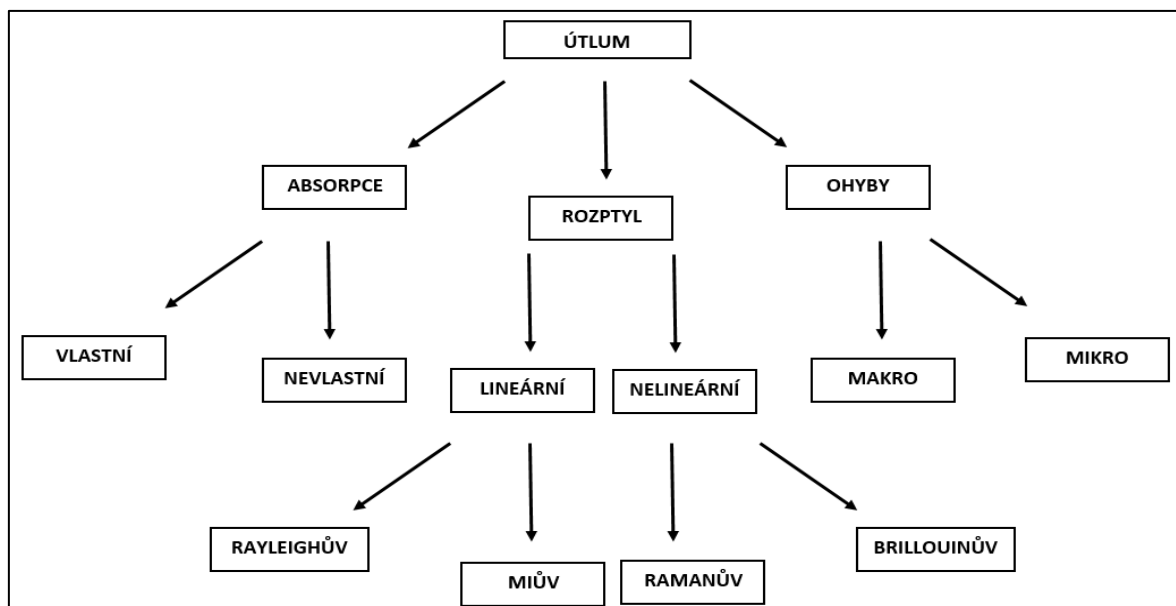
Obrázek 2.11: Ukázka mnohavidového vlákna s gradientní změnou indexu lomu

Mnohavidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu (viz obrázek 2.12) dosahují vyšších útlumů. Jejich hodnoty jsou v intervalu 2,6–50 dB/km, což znemožňuje využití těchto vláken na delší vzdálenosti. Jejich výhodou je nízká cena, která se odvíjí od jednodušší výroby i svařování těchto vláken. Nicméně u těchto vláken vzniká vidová disperze, což má za následek menší šířku pásma. Hodnota tohoto pásma se pohybuje v rozsahu 6–50 MHz/km. Pro tento druh vláken je charakteristický ostrý přechod na rozhraní jádra a pláště. To lze vidět i na obrázku 2.12. V tomto případě jsou vidy šířeny skokovým odrazem za principu totální reflexe. I v tomto případě musí platit podmínka $n_1 > n_2$, jak již bylo výše zmíněno. Průměr jádra je v rozpětí 50–62,5 μm , nicméně nejčastěji je používaná hodnota 50 a 62,5 μm . To je shodné s vlákny, které využívají gradientní změnu indexu lomu. Primární a sekundární ochrana je opět nedílnou součástí vlákna. Bez těchto ochranných vrstev by vlákno bylo velmi křehké a nebylo by možné s ním pracovat. Lze tedy shrnout, že základní struktura všech optických vláken je tvořena jádrem, pláštěm a plastovým ochranným pláštěm.



Obrázek 2.12: Ukázka mnohavidového vlákna se skokovou změnou indexu lomu

U většiny optických vláken dochází ke ztrátám, které jsou známy pod pojmem útlum. Tento jev značí zmenšení optického výkonu při průchodu vláknem. Na obrázku 2.13 lze přehledně vidět souhrn všech faktorů, jež způsobují útlum optických vláken [2], [6], [16], [17], [18], [22].



Obrázek 2.13: Přehled faktorů způsobující útlum

Prvním faktorem, který ovlivňuje útlum optických vláken je absorpce. Ta představuje ztráty optického výkonu, které jsou způsobeny vzájemným působením fotonu s atomární strukturou. Energie světla je zde změněna na jiný druh energie, nejčastěji na teplo nebo vibrace. Absorpci je možné rozdělit na dva druhy, a to vlastní a nevlastní. Vlastní absorpce je způsobena interakcí procházejícího světla se základními stavebními atomy optického vlákna. V této skupině je obsažena absorpce v ultrafialové oblasti a absorpce v infračervené oblasti. Ztráta výkonu v důsledku nečistot v optických sítích je zapříčiněna nevlastní absorpcí. Nejčastěji se jedná o přítomnost OH iontů, které mají za následek vznik mikrotrhlinek ve vlákne, které ovlivňují útlum.

Další okolnost, která působí na útlum, je rozptyl. Je to jev, při němž dochází ke změně směru šíření světla za vzájemného působení částic. To způsobuje ztráty přenášeného výkonu ve vlákne. Rozptyly lze rozdělit do dvou skupin, a to na rozptyly lineární a nelineární. Lineární rozptyly se vyznačují existencí nehomogenit v optickém vlákne, které se projevují fluktuací indexu lomu prostředí. Tyto nehomogenity vznikají složením a hustotou skla při jeho tuhnutí a nedají se odstranit. Mezi lineární rozptyly patří Rayleighův rozptyl a Miův rozptyl. Rayleighův rozptyl nastává tehdy, když jsou nehomogenity menší, než vlnová délka světla. Zpravidla se tak děje v pásmu vlnových délek do 1700 nm. Tento jev je způsoben tepelnými kmity krystalické mřížky materiálu, kdy procházející paprsek narazí ve vlákne na nehomogenity atomové struktury vlákna. Dalším lineárním rozptylem je Miův rozptyl. Ten vzniká na částicích, jejichž průměr je srovnatelný s vlnovou délkou procházejícího světla (vodní kapky, prach, mlha). Za příčinu Mieova rozptylu jsou považovány například bublinky, které vznikají při výrobě. Dále může být způsoben výkyvem průměru válcového jádra vlákna, tahovým napětím vlákna, popřípadě jinými nedokonalostmi. Tento jev lze však eliminovat různými technologickými postupy při výrobě vlákna.

Druhou skupinou rozptylů jsou rozptyly nelineární. Ty vznikají při vyšší hustotě optického výkonu, kdy dochází k přechodu optického výkonu z jednoho vidu do druhého. Tento vid je poté šířen stejným či opačným směrem. Zástupci nelineárních rozptylů jsou Ramanův a Brillouinův rozptyl. Pro Ramanův rozptyl je typické, že se mění energie fotonů rozptylujícího se světla. To je zapříčiněno tím, že jsou molekuly vybudeny (excitovány) do vibračního stavu a následně je jejich energie předaná

fotonům. Pro Brillouinův rozptyl je charakteristické, že světelnou vlnu (elektromagnetickou vlnu) lze ovlivnit jinými typy vln. Nejčastěji se jedná o akustické vlny, kdy je za vzájemného působení fotonů a akustických vln rozptýleno optické záření, což má vliv na šíření světelných vln. Mezi nelineární rozptyly je možné zařadit i stimulovaný rozptyl a čtyřvlnné směšování (označované jako FWM – Four Wave Mixing). Stimulovaný rozptyl je jev, během něhož dochází ke srážení vln s tepelně kmitajícími atomy krystalické mřížky optického vlákna. Čtyřvlnné směšování si lze představit jako intermodulační zkreslení, které je zapříčiněno nelineárními jevy optického vlákna. Je tedy možné říci, že pokud jsou do vlákna navázány dvě a více dostatečně silných optických záření o různé vlnové délce, tak může dojít ke vzniku nového záření o nové vlnové délce. Tento problém nastává hlavně u DWDM systémů, kde je možné zaznamenat přenos energie a přeslechu mezi DWDM kanály.

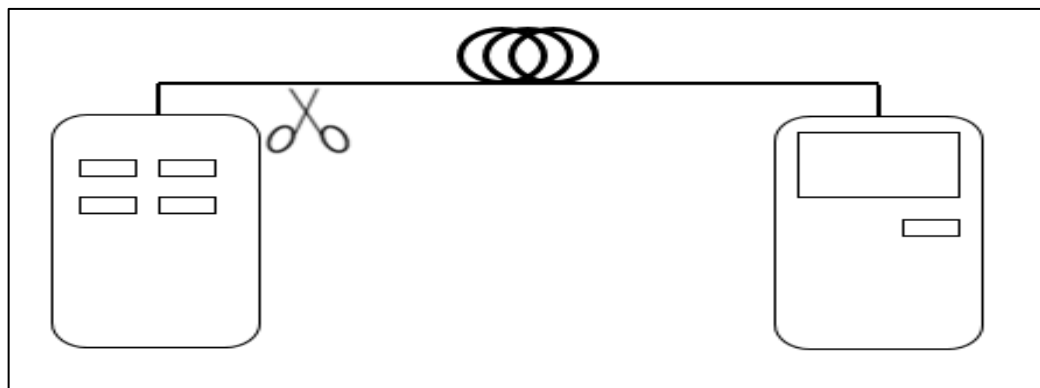
Další prvky, které zásadně ovlivňují útlum, jsou ohyby. Ty jsou rozděleny na dvě podskupiny, a to makroohyby a mikroohyby. Mikroohyb disponuje zakřivením, jenž je menší než samotný průměr jádra optického vlákna. Je způsoben nedokonalostmi ve struktuře optického vlákna, které vznikají při jeho samotné výrobě, při navíjení optického vlákna na cívku nebo během nanášení ochrany na vlákna. Druhá podskupina, makroohyby, jsou způsobeny samotným ohybem optického vlákna. V zásadě lze říct, že makroohybem dojde k vyvázání části energie z jádra do pláště a zvýší se útlum. U těchto ohybů je znám pojem kritický poloměr zakřivení, při kterém je světelný paprsek z optického vlákna 100% vyvázán. Pro stanovení velikosti kritického poloměru je zapotřebí znát typ použitého optického vlákna, indexy lomu jádra a pláště i vlnovou délku [1], [18], [22].

2.6 Měření útlumů optických tras

Tato podkapitola je věnována měření útlumů na optických trasách. Je využíváno tří standardních metod měření, a to metody dvou délek, metody vložných ztrát a metody OTDR (Optical Time–Domain Reflectometry), někdy označované jako metoda měření zpětného rozptylu (Back–Scattering Method). Tyto metody měření jsou doporučovány IEC (International Electrotechnical Commission).

Metoda dvou délek (Cut–Back) je označována jako nejpresnější metoda pro měření útlumů na trase. Ačkoliv je doporučována jako referenční metoda, jedná se o destrukční postup. Nejprve je na měřeném vlákně o známé délce změřen optický výkon P_2 a následně je optické vlákno zlomeno u zdroje (doporučená vzdálenost jsou 2 metry). Po úpravě vlákna je trasa znovu proměřena a je zjištěn výkon P_1 . Útlum optického vlákna je udáván v decibelech (dB), jeho výpočet lze vidět v rovnici 2.3 a schéma zapojení v obrázku 2.14.

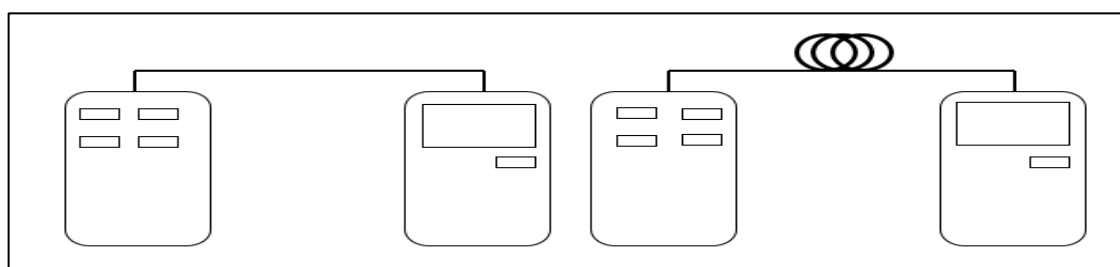
$$A = 10 \times \log \frac{P_1}{P_2} \quad (2.3)$$



Obrázek 2.14: Ukázka měření dvou délek

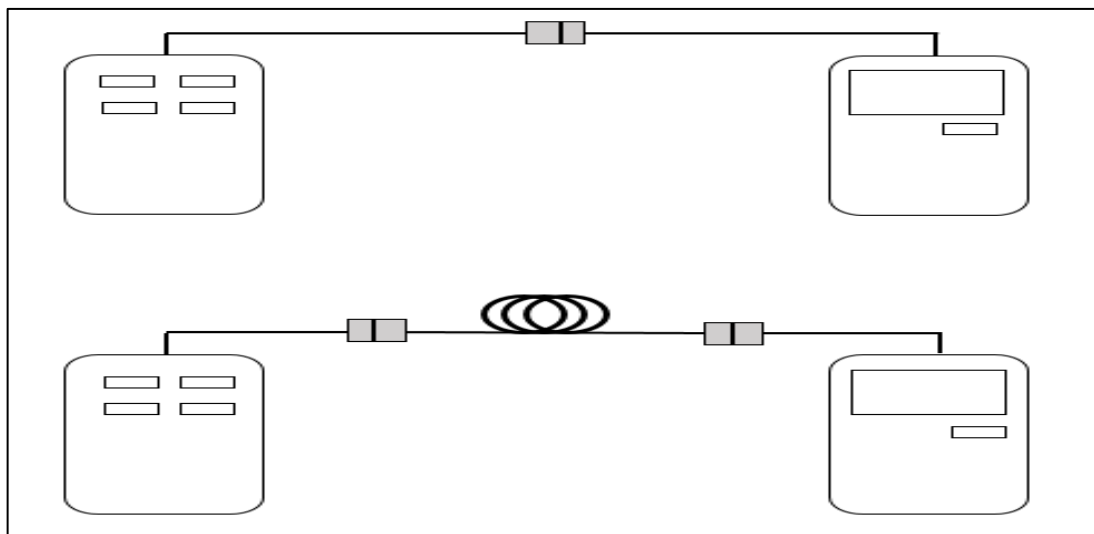
Metoda vložných ztrát (Insertion-Loss), se využívá pro měření optických vláken, kabelů či jiných součástek (coupler, splitter aj.) používaných v optických sítích. Tato metoda není destruktivní, důsledkem čehož disponuje menší přesností. Postup měření má dvě fáze. Prvním krokem je provedení kalibrace měřících přístrojů. To je uskutečněno propojením zdroje a měřiče pomocí referenčního optického vlákna (doporučená délka je 2 metry). Tímto způsobem je změřena referenční hodnota P_1 . V druhé fázi je referenční vlákno vyměněno za měřené vlákno či měřenou součástku. Následně je zjištěna hodnota P_2 a vypočten útlum na trase podle vztahu 2.3. Základním východiskem této metody je určení poklesu výkonu na detektoru. Je využívána v místech, kde nelze vlákna zkrátit či zlomit. Ve standardu ISO/IEC((Implementation and Operation of Customer Premises Cabling, Testing of Optical Fibre Cabling) 14763-3 z roku 2014 jsou definované tři metody měření útlumu, označované jako 1a, 1b a 1c. Dříve byly tyto varianty označovány jako A.1, A.2 a A.3.

U metody 1a je využito jednoho referenčního patchcordu. Ten je po zkalibrování přístrojů odpojen a na jeho místo je připojena měřená optická trasa. Tato metoda je vhodná pro měření nově vybudovaných tras. Dochází ke změření trasy mezi patchpanelem a patchpanelem.



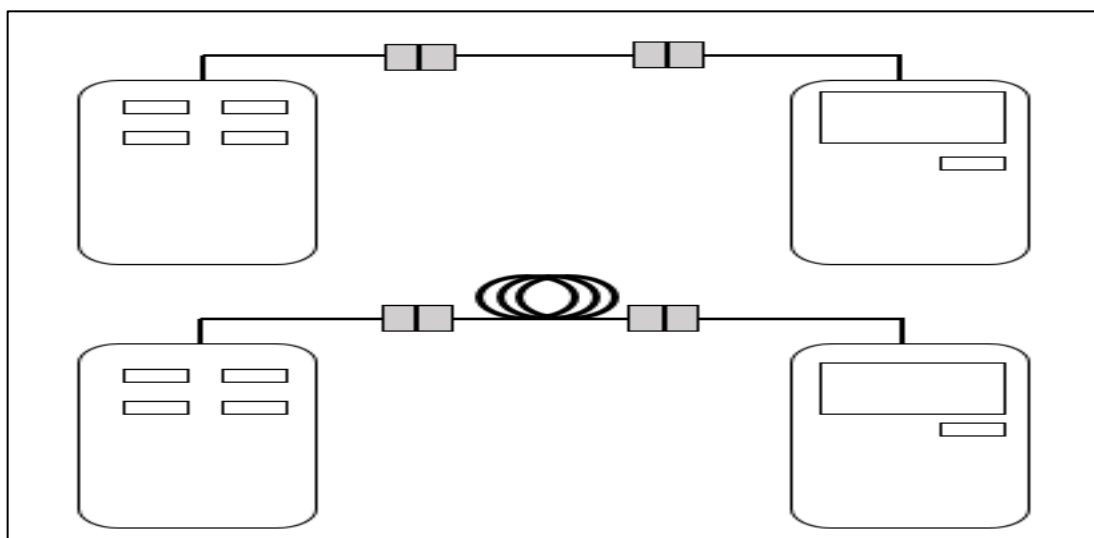
Obrázek 2.15: Ukázka měření vložných ztrát metoda 1a

Pro metodu 1b je charakteristické využití dvou referenčních patchcordů. Jakmile dojde ke kalibraci, jsou patchcody rozpojeny a mezi ně je vložena měřená trasa. Pro praktická měření však tato metoda není doporučována, jelikož mezi referenčními vlákny je využíván pouze jeden konektor. Pro měření trasy je zapotřebí druhého konektoru. Jeho zapojením však dochází k negativnímu ovlivnění útlumu.



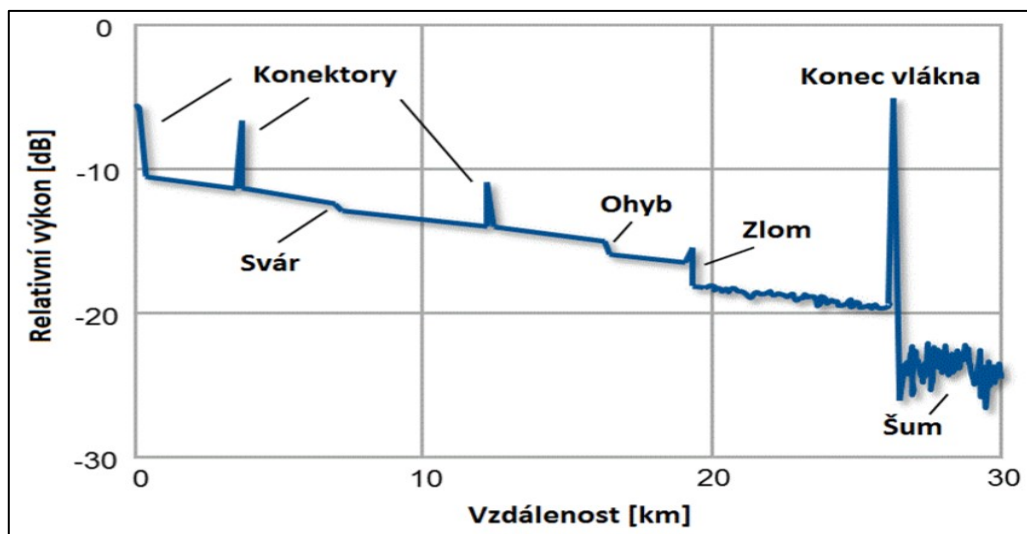
Obrázek 2.16: Ukázka měření vložných ztrát metoda 1b

Metoda 1c patří mezi doporučované měřicí metody. Je zde využito tří referenčních patchcordů. Jakmile jsou přístroje zkalibrované, dojde k odpojení prostředního optického vlákna, které je následně nahrazeno měřenou trasou. Dochází tedy k měření kompletní trasy mezi patchcordy.



Obrázek 2.17: Ukázka měření vložných ztrát metoda 1c

Dalším způsobem měření útlumu na trase je metoda OTDR. K analyzování trasy je využito Rayleighova rozptylu v optických vláknech, popřípadě Fresnelova odrazu na koncích vláken. Ze zařízení OTDR je do optického vlákna vyslán úzký impuls a následně je zaznamenán výkon odražený zpět do detektoru. K těmto odrazům dochází zejména na spojích, svárech, ohybech či různých nehomogenitách. V zařízení OTDR je možné zmapovat útlumy a vykreslit trasu včetně vyznačení všech důležitých informací. Jedná se o neinvazivní měřicí metodu, která je využívána při provozu či montáži optických sítí. Příklad měření lze vidět na obrázku 2.18 [3], [6], [21], [26].



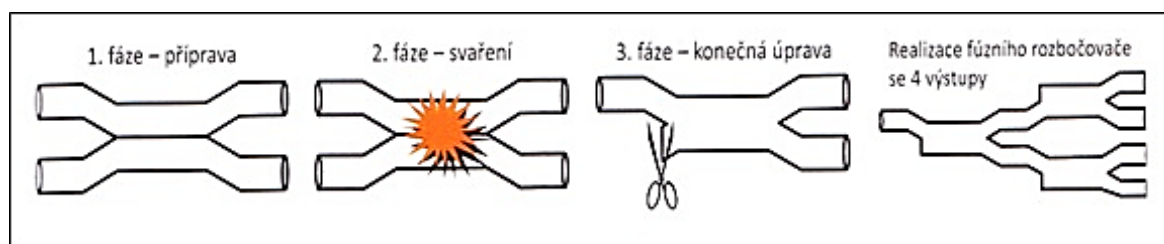
Obrázek 2.18: Ukázka OTDR výstupu [26]

3 Teoretický rozbor optického coupleru a jeho parametrů

Obsahem této kapitoly jsou základní informace související s optickým couplerem. Konkrétně je zde uveden princip jeho fungování včetně porovnání s tzv. splitterem. Následně jsou popsány dvě výrobní technologie coupleru a technické parametry související s tímto pasivním optickým prvkem.

Coupler, v překladu rozbočovač, je pasivní optický prvek, který je využíván v PON sítích. Jelikož je pasivní, není třeba ho napájet, nepotřebuje management ani dohled. Je aktivní pouze tehdy, když je k němu přiveden optický signál. Kromě coupleru je v pasivních optických sítích využíván i optický splitter. Jedná se také o pasivní optický prvek. Ačkoliv jsou někdy tyto prvky zaměňovány, existuje mezi nimi zásadní rozdíl. Zatímco funkcí splitteru je rozbočování nebo slučování optického signálu, v coupleru jsou obsaženy obě tyto funkce zároveň. Jinak řečeno, pokud je v optické síti použit splitter, pak je zapotřebí dvou těchto prvků. Jeden je uplatněn ve směru sestupném pro rozbočení signálu z jednotek OLT na koncové jednotky ONU a ONT a druhý ve směru vzestupném pro sloučení signálu. V případě stejné konfigurace lze dva splittery nahradit jedním optickým couplerem, prostřednictvím kterého je signál rozbočen v sestupném směru od jednotky OLT ke koncovým jednotkám ONU a ONT i sloučen ve směru vzestupném. Optické couplery je možné vyrábět dvěma technologickými metodami.

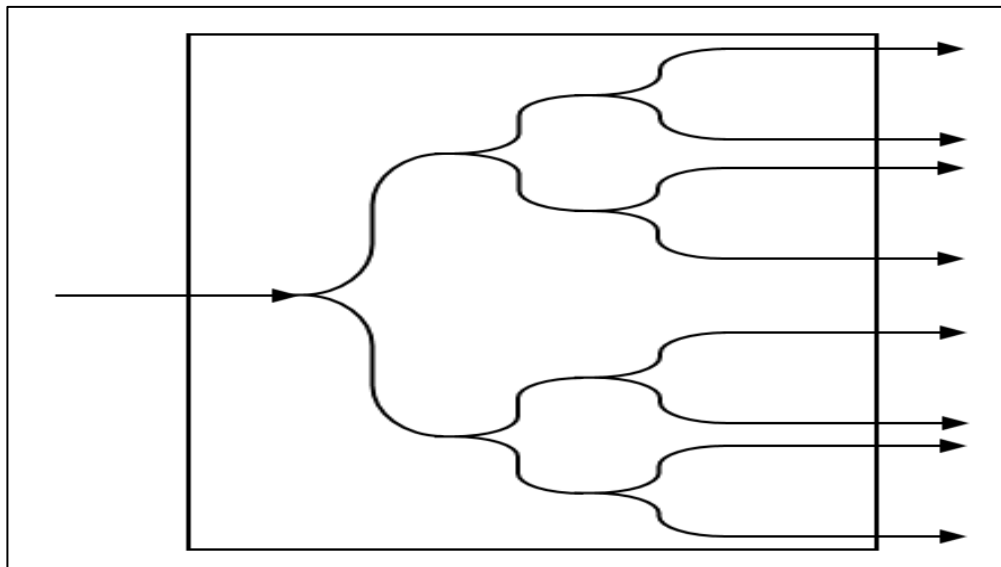
První technologií výroby jsou tzv. fúzní rozbočovače označované jako FBT (Fused Bionic Taper). Tento výrobní proces je starší a vychází ze svařování optických vláken. Z obrázku 3.1 je patrné, že vnitřní stavba optických couplerů je tvořena tzv. Y–články, které jsou za sebou řazeny v kaskádě. Výsledkem je vytvoření coupleru s jedním vstupem a čtyřmi výstupy. Prostřednictvím kaskádního řazení lze vytvořit coupler s požadovaným počtem výstupů. Tento postup výroby je složen ze třech fází. První krok výrobního procesu zahrnuje přípravu optických vláken. Konkrétně je nutné odstranit ochranu z optických vláken (primární i sekundární, pokud jimi vlákna disponují) včetně odstranění částí pláště. V druhé etapě jsou vlákna svařena a dochází k přenosu části optického výkonu do druhého vlákna. Na závěr je provedena konečná úprava, která spočívá v odstranění přebytečných vstupů. Tímto způsobem tedy vznikl coupler s jedním vstupem a čtyřmi výstupy, označovaný jako 1:4. Nevýhodou tohoto způsobu výroby je náročnost celého procesu. Velikost sváru ovlivňuje poměr, v jakém je optický výkon na vstupu rozložen do obou vláken. To je důvod, proč jsou touto technologií vyráběny couplery s malým počtem výstupů.



Obrázek 3.1: Výroba coupleru technologií FBT [1]

Dalším typem optických couplerů jsou tzv. planární rozbočovače, označované jako PLC (Planar Lightwave Circuit). Ačkoliv se jedná o proces modernější, je technologicky náročný, a proto jsou výrobní náklady vysoké. V této výrobní technologii jsou nejprve vyřezány skleněné destičky, ve kterých jsou vytvořeny masky. Ty slouží k separování určitých vlnových délek, jež bývají propouštěny. V dalším kroku jsou vstupní a výstupní optická vlákna připojena do vláknového pole, které obsahuje další skleněné destičky. Do těchto destiček jsou následně vyřezány drážky ve tvaru V, do nichž jsou

založena jádra optických vláken. Tímto způsobem je složen celý coupler dohromady. Poté dojde k zatavení coupleru do pevného ochranného obalu. Takto vzniklý coupler disponuje větším rozbočovacím poměrem, který může nabývat 32, 64 nebo až 128 výstupů. Na obrázku 3.2 lze vidět ukázkou PLC coupleru s jedním vstupem a osmi výstupy, označovaný 1:8.



Obrázek 3.2 Stavba PLC coupleru

Každý z výrobců optických couplerů, poskytuje o svém výrobku technické specifikace. Tyto informace jsou zapotřebí znát předtím, než je coupler použit v optické síti. Mezi základní parametry patří rozbočovací poměr, dělicí poměr, maximální vložný útlum, typický vložný útlum, směrovost, pásmo pracovních vlnových délek, rozsah pracovních teplot, popřípadě útlum odrazu a další.

Rozbočovací poměr určuje počet výstupů daného coupleru a je vyjadřován jako poměr 1:N. V optických sítích jsou nejčastěji používány couplery typu 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64 a 1:128. Nicméně u asymetrických rozbočovačů lze vytvořit i coupler s rozbočovacím poměrem 1:3 či 1:6 tj. 3 a 6 výstupů.

Dělicí poměr vyjadřuje poměr, v jakém jsou vůči sobě výkony signálů na výstupu rozbočovače. Tento parametr je udáván v %. Couplery mohou mít dělicí poměry symetrické nebo asymetrické. Symetrický coupler značí, že je dělení výkonu stejné do každé větve. U couplerů s asymetrickým dělicím poměrem, je pro každý výstup optický výkon rozdílný. Další variantou dělicího poměru je pevný a nastavitelný dělicí poměr. První případ, tedy pevný dělicí poměr, je nastaven již od výroby, zatímco nastavitelný dělicí poměr lze měnit v závislosti na vzniklé situaci. Výrobci mohou vytvářet coupler s dělicím poměrem i na základě přání zákazníků, a to symetrický poměr 50 % – 50 %, či různé nesymetrické varianty 1 % – 99 %, 40 % – 60 %, 30 % – 70 % a jiné. Jedná se například o symetrický coupler 1:2 (tj. jeden vstup a dva výstupy) s dělicím poměrem 50 % – 50 %.

Jak již bylo zmíněno, coupler rozděluje a zároveň slučuje optický signál. Tento proces představuje hlavní zdroj útlumu v optické distribuční síti, který je označován jako vložný útlum. Velikost vložného útlumu závisí na rozbočovacím poměru (na počtu výstupů z coupleru) a také na tom, zda je coupler symetrický či asymetrický. Jednotkou vložného útlumu je decibel, zkratka dB. Většina výrobců couplerů udává hodnoty vložných útlumů ve svých technických specifikacích. Může se jednat

o maximální vložný útlum nebo typický vložný útlum pro danou konfiguraci coupleru, jak lze vidět v tabulce 3.1.

<i>Rozbočovací poměr</i>	<i>Maximální útlum [dB]</i>	<i>Typický útlum [dB]</i>
1x2	3,9	3,5
1x4	7,4	6,9
1x8	10,8	9,8
1x16	14,1	13,5
1x32	17,3	16,5
1x64	21	20
1x128	25,3	23,5

Tabulka 3.1: Ukázka vložných útlumů PLC coupleru od firmy SQS vláknová optika

Dalším parametrem, který je potřeba znát při návrhu optické sítě je tzv. útlum přeslechu, známý také jako směrovost. Určuje, jak velký optický výkon přechází z jednoho kanálu do druhého. I v tomto případě je měřicí jednotkou decibel (dB). Směrovost by měla vykazovat vysoké hodnoty, jelikož není žádoucí, aby výkon směřující do určitého výstupu přecházel do jiného výstupu. Standardní hodnota směrovosti by měla být větší nebo rovna 50 dB. To je u výrobců garantováno. Na požádání lze vyrobit i coupler, jehož směrovost bude větší než 70 dB. Na závěr je nutné podotknout, že směrovost je měřena kombinací všech výstupů.

Jak již bylo výše zmíněno, kromě směrovosti je ve výrobních specifikacích uváděna i pracovní vlnová délka a operační teplota. Rozsah vlnových délek je převážně v intervalu 1250–1630 nm. Couplery lze vyrábět i pro určité pracovní vlnové délky. Může se jednat o coupler, jenž pracuje na vlnových délkách 1310 a 1550 nm.

Operační teplota vymezuje teplotní rozsah, v němž coupler dokáže pracovat. Tento interval garantuje celkovou funkčnost coupleru s hodnotami, které jsou uváděny v technických specifikacích.

Při měření coupleru se lze navíc setkat s pojmy jako celkové ztráty a homogenita ztrát. Oba parametry jsou vyjadřovány v dB, přičemž celkové ztráty by se měly rovnat 0 dB. Nicméně v praxi není tohoto výsledku možné dosáhnout a celkové ztráty se zpravidla pohybují okolo 1 dB.

Homogenita ztrát je výpočetní parametr a představuje rozdíl mezi maximálním vložným útlumem a minimálním vložným útlumem. Výsledná hodnota tohoto parametru by měla být velmi nízká [1], [2], [4], [14], [15].

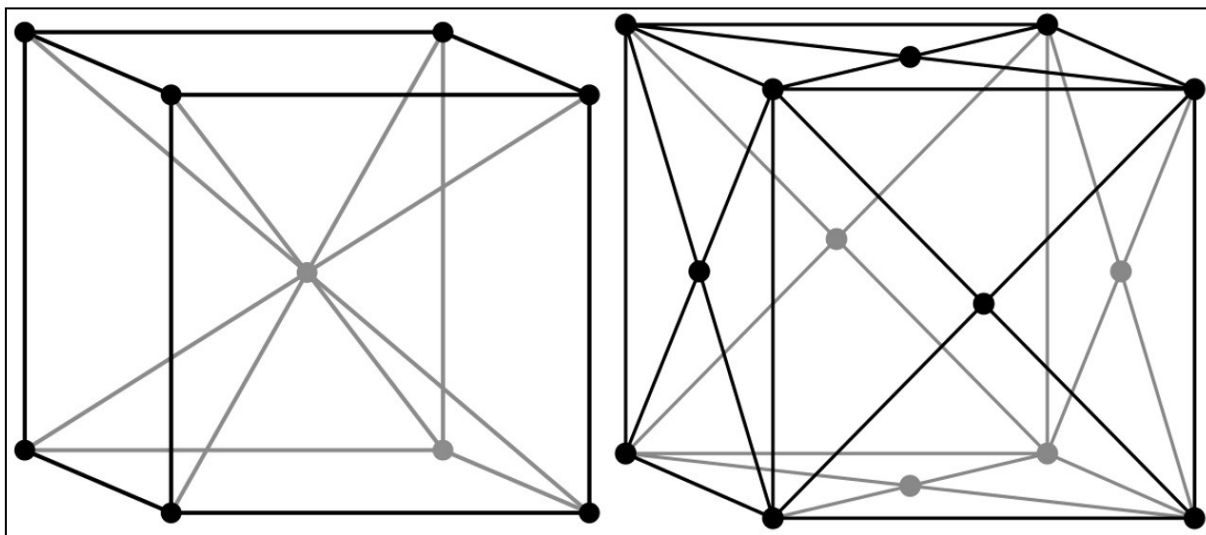
4 Popis tepelného stárnutí optického děliče

Tato kapitola je zaměřena na fyzikální veličinu teplo. Po uvedení teoretické definice je prostor věnován soustavám krystalických mřížek a přenosu tepla vedením, prouděním a zářením. V závěru kapitoly je popsáno tepelné namáhání optických couplerů v praxi. Je zde uvedena technická specifikace použitých couplerů, jejich schématické zapojení, vývoj měření a ilustrativní zobrazení.

Teplo, označované jako Q , je veličina, která popisuje změny vnitřní energie. Jeho jednotkou je joule. Pod pojmem vnitřní energie si lze představit souhrn kinetické a potenciální energie, jenž způsobuje pohyb atomů a molekul. Pokud se molekuly pohybují rychleji, zvyšuje se teplo tělesa. Teplota tedy určuje, jak rychlý je pohyb molekul uvnitř daného tělesa.

Každá látka tuhého skupenství má krystalickou mřížku (strukturu), jejíž částice jsou sestaveny způsobem, který zajišťuje shodné okolí pro každou z nich. Jsou v polohách, z nichž se nemohou vzdálit, jelikož jsou k tomuto místu poutány silou. Částice každého tělesa však neustále vykonávají pohyb (kmitání), který ustává až při absolutní nule ($-273,15^{\circ}\text{C}$ to je rovno 0 K). Síly lze rozdělit na atomární či elektrostatické. Krystalické mřížky lze zařadit do několika soustav:

- trojklonná,
- jednoklonná,
- kosočtverečná,
- čtverečná,
- klencová,
- šesterečná,
- krychlová.



Obrázek 4.1: Ukázka prostorově centrované (vlevo) a plošně centrované (vpravo) krychlové mřížky [23]

Prostorově centrovaná mřížka disponuje jedním atomem v každém rohu a jedním atomem ve středu krychle. Naopak typickým prvkem plošně centrované mřížky je jeden atom v rozích a jeden atom uprostřed každé stěny.

Uspořádání částic atomů a molekul v krystalické mřížce lze dále rozdělit na látky krystalické a amorfni. Pro krystalické pevné látky je charakteristickým rysem pravidelné uspořádání jednotlivých atomů a molekul. Mezi takoveto látky patří například diamant a NaCl. U amorfni látek je pravidelnost uspořádání na větší vzdálenosti porušena. Tyto látky se chovají, jako by neměly pravidelnou krystalickou mřížku. Lze zde zařadit sklo, vosk, asfalt, parafin a další [5], [23], [25].

4.1 Přenos tepla

Přenos tepla je jev, při kterém dochází k tepelné výměně energie mezi dvěma látkami. Cílem je vyrovnání tepelného rozdílu mezi těmito látkami. Aby docházelo k tepelnému přenosu, musí se mezi látkami vyskytovat teplotní rozdíl. Teplo vždy přechází z teplejší do chladnější látky. Jakmile jsou teploty obou těles vyrovnány, je přenos ukončen. K šíření (přenosu) tepla může dojít třím způsobem, vedením (kondukcí), prouděním (konvekci) a zářením (radiací).

V tuhých látkách je nejčastěji využito šíření tepla vedením. Atomy a molekuly, z nichž jsou tuhé látky složeny, vykonávají neustálý pohyb. Pokud je teplota látky zvýšena, dojde k intenzivnějšímu pohybu molekul. Místo, které disponuje vyšší kinetickou energií, přenáší tepelnou energii do míst, kde je tato energie nižší. V důsledku srážení rychlejších a pomalejších částic dochází k přenosu tepla. Jelikož jsou molekuly a atomy v tuhých tělesech na sebe vázány silami, dochází při srážkách k předávání energie. Při vedení tepla jsou důležitými faktory například teplotní spád, délka dráhy přenosu, vlastnosti a průřez materiálu.

Prostřednictvím teplotního spádu je popisována rychlost a směr šíření tepla. Délka dráhy přenosu, popřípadě velikost předmětu, značí, kolik je potřeba vyvinout energie pro jeho zahřátí. Prostřednictvím průřezu materiálu jsou charakterizovány tepelné ztráty. Pokud je těleso i jeho průřez malý, pak jsou ztráty minimální. Díky vlastnostem je možné zjistit, které materiály přenášejí teplo lépe a které nikoliv. Nejlepší vodiči tepla je stříbro, zatímco špatnými vodiči jsou kapaliny a plyny.

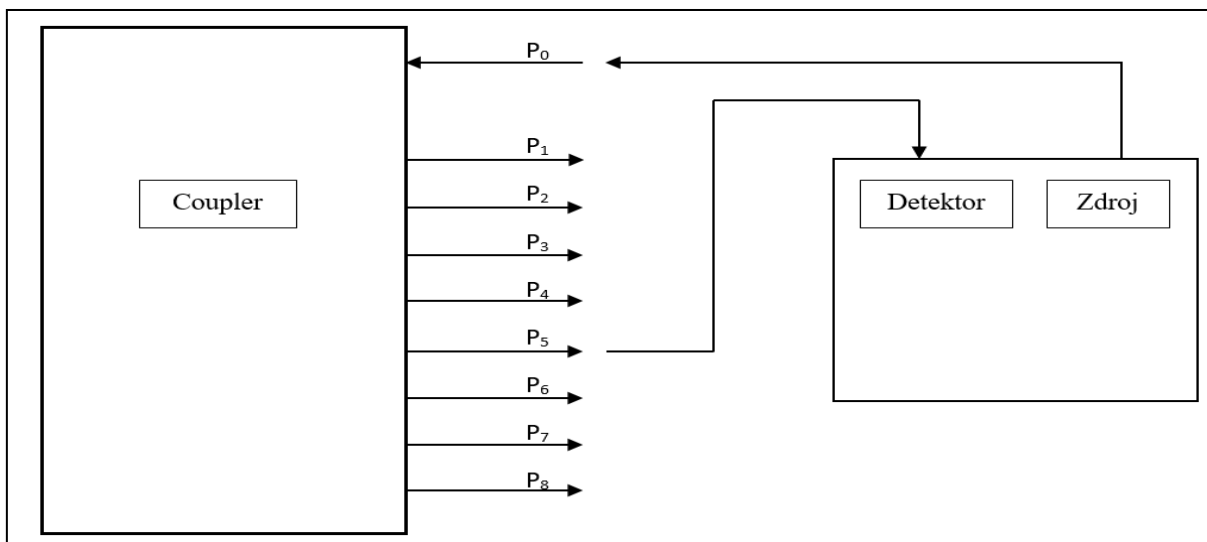
Dalším typem přenosu tepla je proudění. Tento způsob přenosu je uplatňován především u plynů a kapalin. Jestliže je plyn nebo kapalina zahřátá, tak částice proudí od zdroje a nese s sebou tepelnou energii. Při ohřevu tekutin teplejší částice disponují nižší hustotou a stoupají k povrchu, kdežto chladnější klesají ke dnu. U plynů je tento proces podobný. Teplý vzduch stoupá vzhůru a tlačí chladnější vzduch k zemi. Proudění v atmosféře vytváří vzdušné proudy (turbulentní a laminární proudy), které využívají ptáci nebo piloti kluzáku k získání potřebné výšky letu.

Poslední způsob přenosu tepla je skrze záření. Každé těleso nepřetržitě vysílá do prostoru tepelné záření. To je reprezentováno elektromagnetickými vlnami o určitých vlnových délkách, které disponují určitým množstvím energie. Typickým příkladem je přenos tepla ze Slunce na Zem. Vyzařování, popřípadě příjem tepelného záření, závisí na mnoha faktorech, mezi které lze zařadit vzdálenost, plochu, teplotu, povrch a barvu tělesa.

Teplota klesá s rostoucí vzdáleností od zdroje záření. Pokud je povrch tělesa velký, lze očekávat vyšší vyzařování tepla než u malého zdroje. Krom velikosti povrchu tělesa, je důležité sledovat i povrchovou strukturu. Drsný povrch totiž přijímá daleko více tepla, než hladký. V rámci barev je prokázáno, že tmavé barvy přijímají více tepla oproti těm světlým. Jestliže těleso dosahuje vyšší teploty, je z něho vyzařováno větší množství tepla [5], [23], [24], [25].

4.2 Popis tepelného namáhání a měření couplerů

Tepelné namáhání a následná měření probíhala v laboratořích Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Tepelnému namáhání byly podrobeny dva couplery, coupler čínské firmy Gezhi Photonics a coupler české firmy Optokon. Výsledky měření byly zaznamenány v programu Excel, kde jsou couplery popsány následovně: coupler firmy Gezhi je označen Čína a coupler firmy Optokon jako Optokon. Operační teplota coupleru Gezhi je v rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ a u coupleru firmy Optokon je v intervalu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nejdříve bylo provedeno základní měření s novými couplery (bez tepelného zásahu), poté byly oba couplery umístěny do elektrické sušicí trouby, kde podstoupily tepelné namáhání. Teplota v troubě byla nastavena na vyšší hodnotu než je operační teplota obou couplerů, pohybovala se okolo $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měření probíhala v týdenních intervalech pomocí zařízení EXFO AXS–200/325. Tento přístroj byl použit jako zdroj optického výkonu, a zároveň jako detektor. Pro měření byla využita metoda 1c (norma ISO/IEC 14763–3 Implementation and Operation of Customer Premises Cabling, Testing of Optical Fiber Cabling). Celkově byla použita tři vlákna. První vycházelo ze zdroje, prostřední vlákno bylo nahrazeno měřeným couplerem a poslední vlákno vstupovalo do detektoru. Schéma a měřicí stanici lze vidět na obrázcích 4.2 a 4.3.



Obrázek 4.2: Schéma zapojení měření výkonu u výstupu 5



Obrázek 4.3: Měřicí stanice

V tabulkách 4.1 a 4.2 jsou uvedeny technické specifikace jednotlivých couplerů, které byly tepelně namáhány a následně měřeny.

Vlnové délky [nm]	1310/1550
Rozbočovací poměr	1x8
Maximální vložné ztráty	10,7 dB
Směrovost standardní	> 50 dB
Směrovost na požádání	>70 dB
Operační teplota [°C]	−40 +70
Skladovací teplota [°C]	−40 +85

Tabulka 4.1: Coupler firmy Optokon [20]

Rozsah vlnových délek [nm]	1260–1650
Rozbočovací poměr	1x8
Maximální vložné ztráty	10,3 dB
Typický vložný útlum	10 dB
Minimální směrovost	55 dB
Operační teplota [°C]	−40 +85
Skladovací teplota [°C]	−40 +85

Tabulka 4.2: Coupler firmy Gezhi [19]

5 Měření optického děliče během tepelného stárnutí

Z minulé kapitoly je již známo, že měření probíhala v laboratořích Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Byly zkoumány dva couplery, a to český od firmy Optokon a čínský Gezhi. Celkově bylo provedeno 70 pozorování s odstupem 168 hodin.

Obsahem této kapitoly je detailní popis jednotlivých parametrů, které byly při měření couplerů sledovány. Jedná se o výkon, vložný útlum, celkové ztráty, homogenitu ztrát, dělicí poměr a směrovost. Získané výsledky byly zpracovávány v programu Excel. Pro grafické znázornění a vypočtení aproximací třetího řádu byl využit program Matlab. Explorační analýza a boxploty jednotlivých výsledků byly provedeny prostřednictvím statistického programu RKWard. U boxplotů je důležité podotknout, že při jejich realizaci se vyskytla odlehlá pozorování, se kterými bylo nutné i nadále pracovat. Nebylo možné určit jejich přesnou příčinu a odstraněním by mohlo dojít ke zkreslení výsledků.

5.1 Měření výkonu

Tato hodnota je důležitá pro další výpočty jednotlivých parametrů, jako je vložný útlum, dělicí poměr, celkové ztráty a homogenita ztrát. Výkon je udáván v μW , přičemž měření bylo provedeno 20 krát, aby byly minimalizovány chyby měření. Měření probíhala metodou 1c, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.2 a popis této metody je uveden v kapitole 2.6.

5.2 Vložný útlum

Tento parametr představuje hlavní zdroj vložného útlumu v optických sítích a je udáván v decibelech (dB). Je vypočten z výkonu, který vstupoval a poté vystupoval z coupleru. Charakteristická hodnota pro coupler s rozbočovacím poměrem 1:8 je okolo 10 dB. Obecná rovnice pro výpočet vložného útlumu (Insertion Loss) je zobrazena v rovnici 5.1 [15].

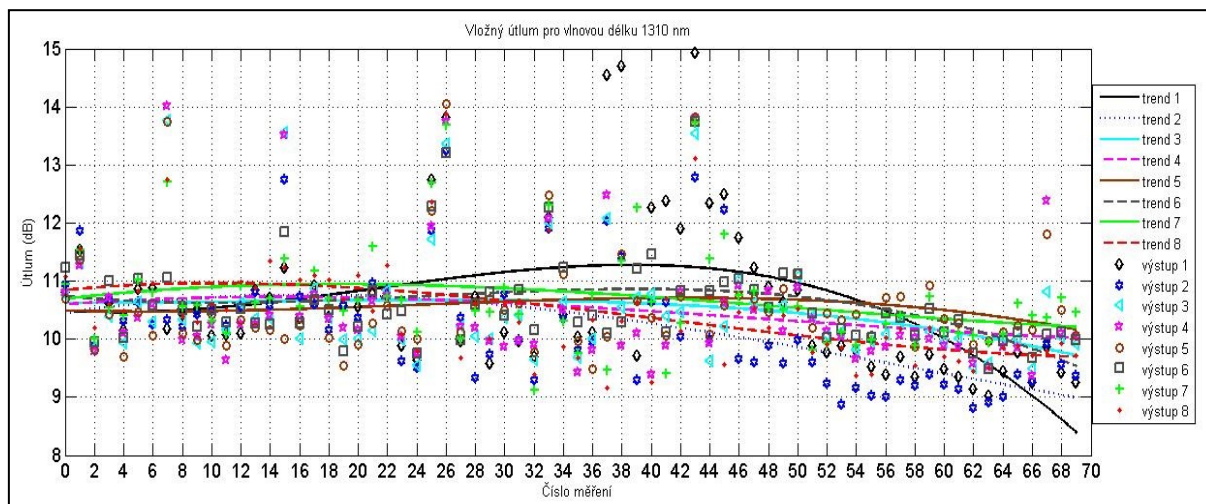
$$IL = -10 \times \log \frac{P_{vyst}}{P_0} \text{ [dB]} \quad (5.1)$$

Pro praktické využití této rovnice bylo vybráno 0. měření pro vlnovou délku 1310 nm (Coupler firmy Optokon). Kde P_0 (2680 μW) je výkon, jenž vstupoval do coupleru a P_1 (220 μW) představuje výkon, který vystupoval z první větve. Výsledná rovnice vypadá následovně:

$$IL = -10 \times \log \frac{220}{2680} = 10,857 \text{ [dB]} \quad (5.2)$$

5.2.1 Vložný útlum coupleru Optokon

Tato podkapitola je zaměřena na vložné útlumy pro vlnovou délku 1310 nm a následně pro vlnovou délku 1550 nm. Nejprve bylo provedeno základní měření, aby bylo zjištěno, jakých hodnot vložných útlumů dosahuje coupler před tepelným namáháním. Průměrné hodnoty v tomto měření dosahovaly 10,9091 dB, nicméně z tabulky 4.1 je známo, že by vložný útlum měl dosahovat maximální hodnoty 10,7 dB. Toto zjištění bylo tedy překvapivé.



Obrázek 5.1: Vložné útlumy pro vlnovou délku 1310 nm (Optokon)

Z obrázku 5.1, je patrné, že po základním měření (0. měření) došlo u všech větví ke zhoršení. U několika větví nastalo zvýšení až o 1 dB a průměr všech výstupů se zvýšil na hodnotu 11,4864 dB. Následně však došlo ke zlepšení všech výstupů a průměrná hodnota vložného útlumu se během druhého měření pohybovala okolo 9,9116 dB. Tento vývoj byl zaznamenán i v průběhu následujících dvou týdnů. Poté docházelo ke kolísání hodnot oběma směry. Od 44. měření až do posledního měření bylo u výstupů 6 a 8 dosahováno lepších hodnot než v případě základního měření. Výstupy 2 a 7 začaly vykazovat zlepšených hodnot od 46. měření, zatímco u výstupu 1 byl tento vývoj zaznamenán až od 51. měření. Průměr vložných útlumů výstupů 1 až 8 po všech provedených měřeních nepřekročil hodnotu 10,7 dB. Výsledná hodnota činila 10,5109 dB. Je však nutné podotknout, že v rámci celkového měření na této vlnové délce bylo dosaženo maximální hodnoty vložného útlumu ve 43. měření, kde byl vložný útlum roven 14,9333 dB. Minimální vložný útlum byl naměřen v 62. měření a to 8,8192 dB. Z výše uvedeného grafu lze vidět, že trendy všech výstupů mají klesající tendenci. Je tedy možné říct, že teplo pozitivně ovlivňuje vložný útlum na vlnové délce 1310 nm. Ukázky rovnic pro výpočty polynomů a jejich koeficient spolehlivosti (R^2) jsou následné:

$$\text{Výstup 1: } y = -0,0000x^3 + 0,0024x^2 - 0,0161x + 10,4921 \quad R^2 = 0,2623 \quad (5.3)$$

$$\text{Výstup 2: } y = 0,0000x^3 - 0,0015x^2 + 0,0410x + 10,4473 \quad R^2 = 0,312 \quad (5.4)$$

$$\text{Výstup 3: } y = -0,0000x^3 + 0,0003x^2 - 0,0006x + 10,6269 \quad R^2 = 0,0796 \quad (5.5)$$

$$\text{Výstup 4: } y = 0,0000x^3 - 0,0007x^2 + 0,0185x + 10,5982 \quad R^2 = 0,0524 \quad (5.6)$$

$$\text{Výstup 5: } y = -0,0000x^3 + 0,0007x^2 - 0,0070x + 10,4925 \quad R^2 = 0,0198 \quad (5.7)$$

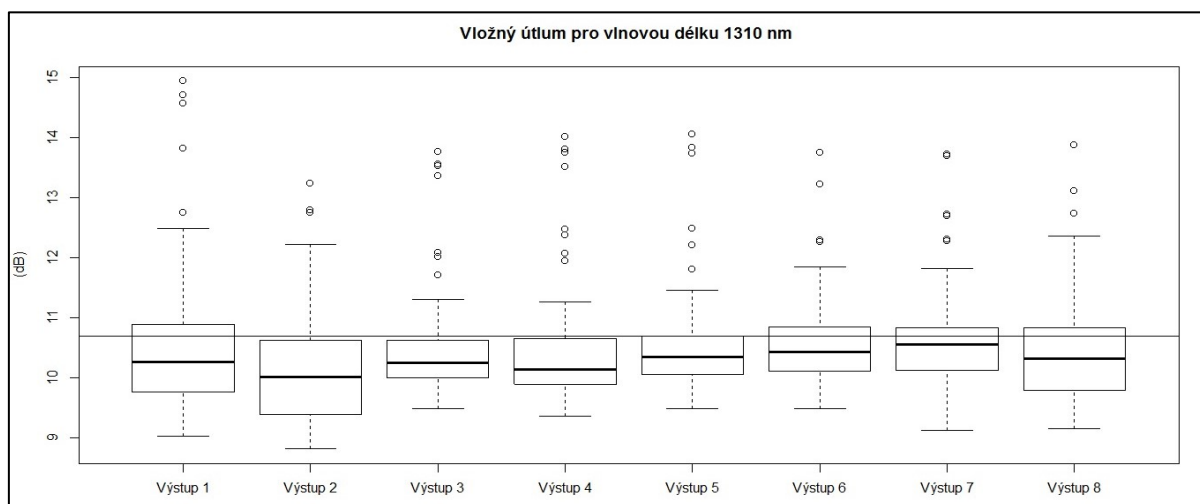
$$\text{Výstup 6: } y = -0,0000x^3 + 0,0015x^2 - 0,0245x + 10,7384 \quad R^2 = 0,2623 \quad (5.8)$$

$$\text{Výstup 7: } y = 0,0000x^3 - 0,0010x^2 + 0,0296x + 10,6925 \quad R^2 = 0,0751 \quad (5.9)$$

$$\text{Výstup 8: } y = 0,0000x^3 - 0,0013x^2 + 0,0240x + 10,8446 \quad R^2 = 0,2623 \quad (5.10)$$

	Výstup 1	Výstup 2	Výstup 3	Výstup 4	Výstup 5	Výstup 6	Výstup 7	Výstup 8
Minimum [dB]	9,026	8,819	9,485	9,371	9,487	9,488	9,131	9,152
Dolní kvartil [dB]	9,77	9,396	9,999	9,898	10,06	10,12	10,13	9,808
Medián [dB]	10,27	10,02	10,25	10,14	10,34	10,43	10,55	10,33
Průměr [dB]	10,63	10,20	10,49	10,48	10,56	10,60	10,69	10,44
Horní kvartil [dB]	10,89	10,63	10,63	10,65	10,69	10,85	10,83	10,81
Maximum [dB]	14,93	13,24	13,76	14,01	14,05	13,75	13,72	13,87
Směrodatná odchylka	1,3014	0,9939	0,9186	1,0255	0,8909	0,7491	0,8595	0,8832

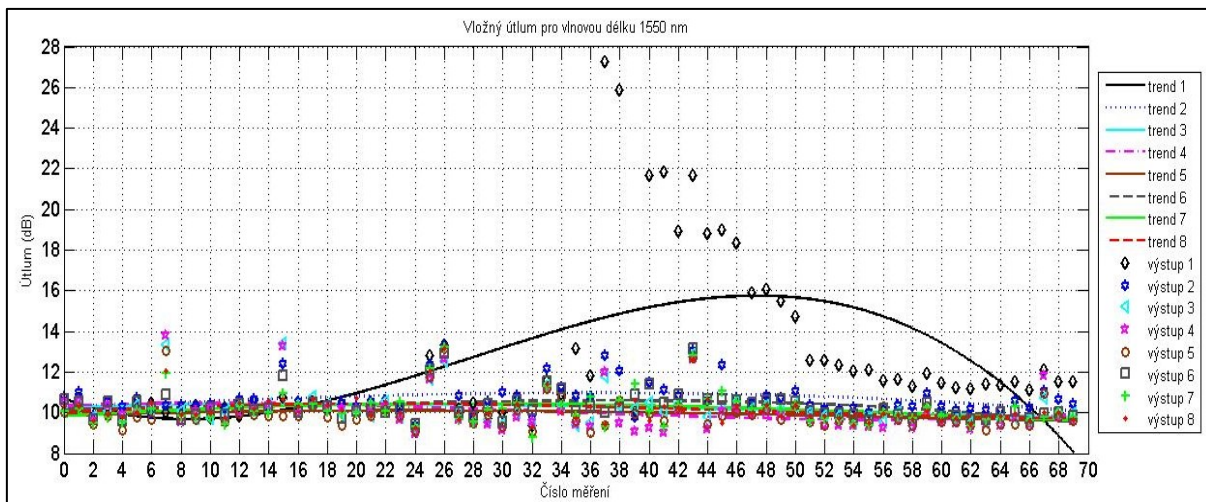
Tabulka 5.1: Explorační analýza vložných útlumů pro vlnovou délku 1310 nm (Optokon)



Obrázek 5.2: Krabicové grafy vložných útlumů pro vlnovou délku 1310 nm (Optokon)

V krabicových grafech jsou shrnuty explorační analýzy vložných útlumů pro jednotlivé výstupy. Na obrázku 5.2 lze vidět přímkou, jež zobrazuje maximální vložný útlum coupleru Optokon. Průměrná hodnota vložných útlumů se u všech výstupů pohybovala pod hranicí 10,7 dB. Výstup 7 se k tomuto číslu pouze přiblížil (10,6897 dB). U této vlnové délky tedy coupler garantovanou hodnotu útlumu nepřekročil, což je pozitivní výsledek.

Tímto byl ukončen popis měření vložného útlumu pro vlnovou délku 1310 nm a v následujícím grafu lze vidět výsledky u vlnové délky 1550 nm.



Obrázek 5.3: Vložené útlumy pro vlnovou délku 1550 nm (Optokon)

Průměrný vložený útlum pro vlnovou délku 1550 nm dosahoval v základním měření 10,4073 dB. Během prvního měření výstupy 3, 6 a 8 vykazovaly lepší hodnoty oproti základnímu měření, zatímco u ostatních výstupů byly zaznamenány zhoršené výsledky. V dalších třech měřeních už bylo u všech výstupů dosaženo lepších hodnot, než tomu bylo u základního měření. Od 5. měření byl vývoj podobný vlnové délce 1310 nm, tedy kolísavé výsledky. Nicméně z obrázku 5.3 lze vidět, že z dlouhodobého hlediska je trend výstupu 1 klesající. Také je možné vidět, že se velmi často hodnoty jednotlivých výstupů pohybují v rozmezí 9 až 12 dB. Je tedy patrné, že tato vlnová délka je odolnější vůči teplu. Výjimkou je výstup 1, který toto zjištění od 33. měření nepotvrzuje. Jeho útlum při 37. měření dosáhl svého maxima, a poté pozvolna začal klesat. Naopak výstup 6 od 44. do posledního měření dosahoval nižších hodnot, než tomu bylo u základního měření. U výstupu 8 byly zlepšené hodnoty zaznamenány od 51. měření. Průměrně nejnižším vloženým útlumem disponoval výstup 4. Nejvyšší hodnota útlumu u této vlnové délky byla zaznamenána u výstupu 7 a to 8,7990 dB. Nejvyšší vložený útlum byl naměřen u výstupu 1, a to 27,2626 dB. Celkový průměr u této vlnové délky byl 10,5140 dB. Ukázky rovnic pro výpočty polynomů a jejich koeficient spolehlivosti (R^2) lze vidět níže.

$$\text{Výstup 1: } y = -0,0002x^3 + 0,0173x^2 - 0,2490x + 10,6721 \quad R^2 = 0,352 \quad (5.11)$$

$$\text{Výstup 2: } y = -0,0000x^3 - 0,0003x^2 + 0,0351x + 10,2472 \quad R^2 = 0,1028 \quad (5.12)$$

$$\text{Výstup 3: } y = 0,0000x^3 - 0,0007x^2 + 0,0209x + 10,2658 \quad R^2 = 0,0624 \quad (5.13)$$

$$\text{Výstup 4: } y = 0,0000x^3 - 0,0017x^2 + 0,0289x + 10,3323 \quad R^2 = 0,1006 \quad (5.14)$$

$$\text{Výstup 5: } y = 0,0000x^3 - 0,0006x^2 + 0,0232x + 9,8496 \quad R^2 = 0,0348 \quad (5.15)$$

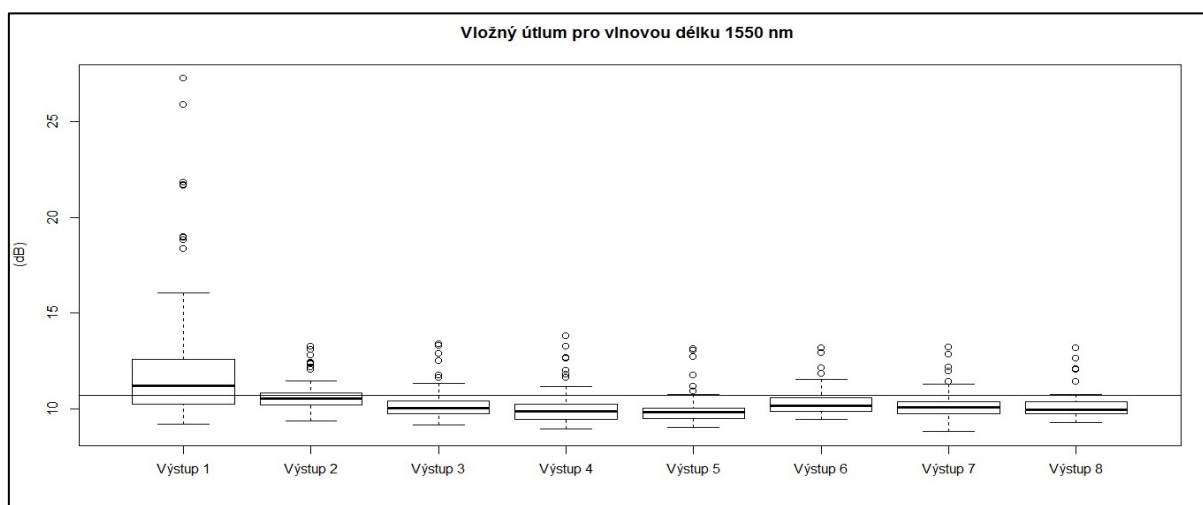
$$\text{Výstup 6: } y = -0,0000x^3 + 0,0005x^2 + 0,0068x + 10,1694 \quad R^2 = 0,1321 \quad (5.16)$$

$$\text{Výstup 7: } y = 0,0000x^3 - 0,0010x^2 + 0,0473x + 9,8241 \quad R^2 = 0,0932 \quad (5.17)$$

$$\text{Výstup 8: } y = 0,0000x^3 - 0,0015x^2 + 0,0485x + 9,9780 \quad R^2 = 0,1111 \quad (5.18)$$

	Výstup 1	Výstup 2	Výstup 3	Výstup 4	Výstup 5	Výstup 6	Výstup 7	Výstup 8
Minimum [dB]	9,208	9,376	9,164	8,963	9,039	9,452	8,799	9,28
Dolní kvartil [dB]	10,23	10,22	9,721	9,431	9,491	9,883	9,725	9,763
Medián [dB]	11,21	10,52	10,03	9,852	9,803	10,16	10,05	9,965
Průměr [dB]	12,53	10,70	10,22	10,06	9,942	10,34	10,17	10,16
Horní kvartil [dB]	12,52	10,84	10,38	10,24	10,03	10,56	10,38	10,35
Maximum [dB]	27,26	13,27	13,39	13,78	13,14	13,15	13,20	13,16
Směrodatná odchylka	3,894	0,7797	0,8482	0,9673	0,8027	0,7011	0,7634	0,8832

Tabulka 5.2: Explorační analýza vložných útlumů pro vlnovou délku 1550 nm (Optokon)

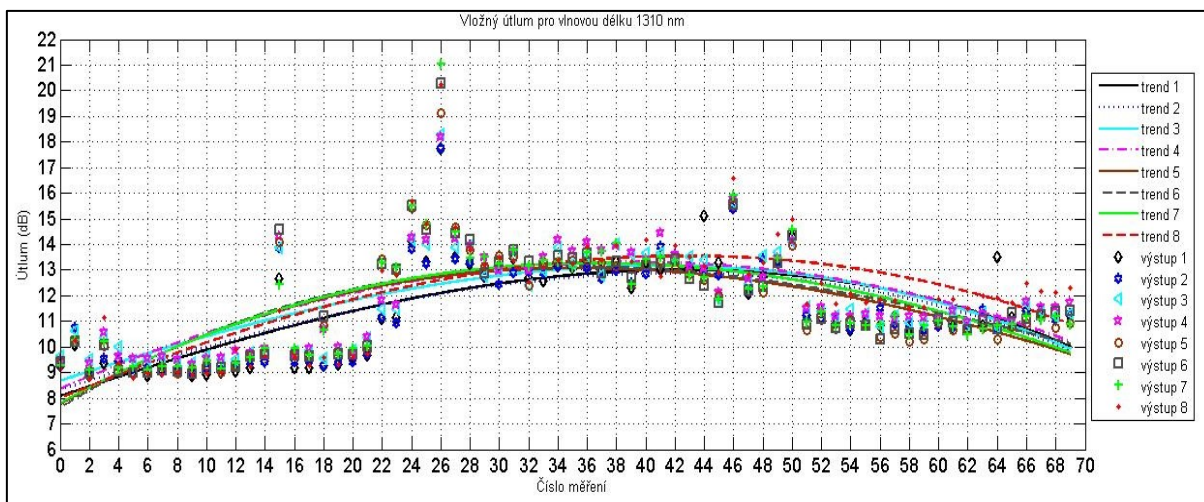


Obrázek 5.4: Krabicové grafy vložných útlumů pro vlnovou délku 1550 nm (Optokon)

Obrázek 5.4 potvrzuje fakt zvýšených hodnot u výstupu 1. Celkový průměr vložného útlumu pro tento výstup byl 12,5345 dB. Hranice 10,7 dB je zvýrazněná přímkou. Boxploty ostatních výstupů potvrzují závěr, že je tato vlnová délka odolnější vůči namáhání teplem. Ačkoliv výstup 1 výrazně stoupl, z celkového hlediska je průměrná hodnota pro tuto vlnovou délku pod hranicí, jež tento výrobce garantuje.

5.2.2 Vložný útlum Gezhi

V této podkapitole jsou shrnuty výsledky měření vložného útlumu u coupleru firmy Gezhi pro vlnové délky 1310 nm a následně 1550 nm. Průběh měření výkonů u couplerů od firmy Gezhi byl shodný s couplerem firmy Optokon. Nejprve bylo provedeno základní měření, a poté byl coupler umístěn do elektrické sušicí trouby, kde byl tepelně namáhán. V technické specifikaci je uveden jak typický, tak maximální vložný útlum. Typická hodnota vložného útlumu činí 10 dB a maximální vložný útlum 10,3 dB. To je o 0,4 dB nižší hodnota, než je tomu u coupleru Optokon.



Obrázek 5.5: Vložné útlumy pro vlnovou délku 1310 nm (Gezhi)

V základním měření u vlnové délky 1310 nm byly zjištěny velmi nízké hodnoty vložného útlumu. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána u výstupu 3, a to 9,6473 dB, zatímco nejnižší hodnota byla naměřena u výstupu 8, a to 9,1414 dB. Průměrný vložný útlum v tomto měření dosahoval 9,3674 dB, což je o 0,6326 dB nižší hodnota, než je typický vložný útlum. V případě porovnání s maximálním vložným útlumem se rozdíl ještě zvýší, a to přesně o 0,9326 dB. Jakmile bylo zahájeno tepelné namáhání, došlo ke zvýšení hodnoty vložných útlumů u všech výstupů průměrně o 1 dB. Ačkoliv ve druhém měření nastalo jejich snížení, v některých případech téměř o 2 dB, tak ve třetím měření vzrostly opět o 1 dB. Od 5. do 12. měření byly u většiny výstupů vykazovány zlepšené hodnoty útlumu oproti základnímu měření. Výstup 4 však od 10. do posledního měření začal dosahovat zvýšených hodnot vložného útlumu. Podobný scénář nastal od 12. měření u výstupů 7 a 8 a od 13. měření u výstupů 5 a 6. Proměnlivé výsledky byly zaznamenány do 18. měření u výstupů 1, 2 a 3, nicméně od 19. měření byly již všechny výstupy zhoršeny oproti základnímu měření. Z obrázku 5.5 je patrné, že trendy všech výstupů jsou si podobné. Nejprve je zaznamenán jejich růst do určitého maxima, a poté následný pokles. Nicméně už nebylo dosaženo hodnot naměřených v základním měření. Ukázky rovnic pro výpočty polynomů a jejich koeficient spolehlivosti (R^2) jsou uvedeny níže.

$$\text{Výstup 1: } y = -0,0000x^3 - 0,0008x^2 + 0,1912x + 8,0802 \quad R^2 = 0,5169 \quad (5.19)$$

$$\text{Výstup 2: } y = -0,0000x^3 - 0,0007x^2 + 0,1760x + 8,3334 \quad R^2 = 0,5016 \quad (5.20)$$

$$\text{Výstup 3: } y = -0,0000x^3 - 0,0010x^2 + 0,1855x + 8,6808 \quad R^2 = 0,4943 \quad (5.21)$$

$$\text{Výstup 4: } y = -0,0000x^3 - 0,0030x^2 + 0,2470x + 8,3767 \quad R^2 = 0,5180 \quad (5.22)$$

$$\text{Výstup 5: } y = 0,0000x^3 - 0,0056x^2 + 0,3244x + 7,7642 \quad R^2 = 0,4818 \quad (5.23)$$

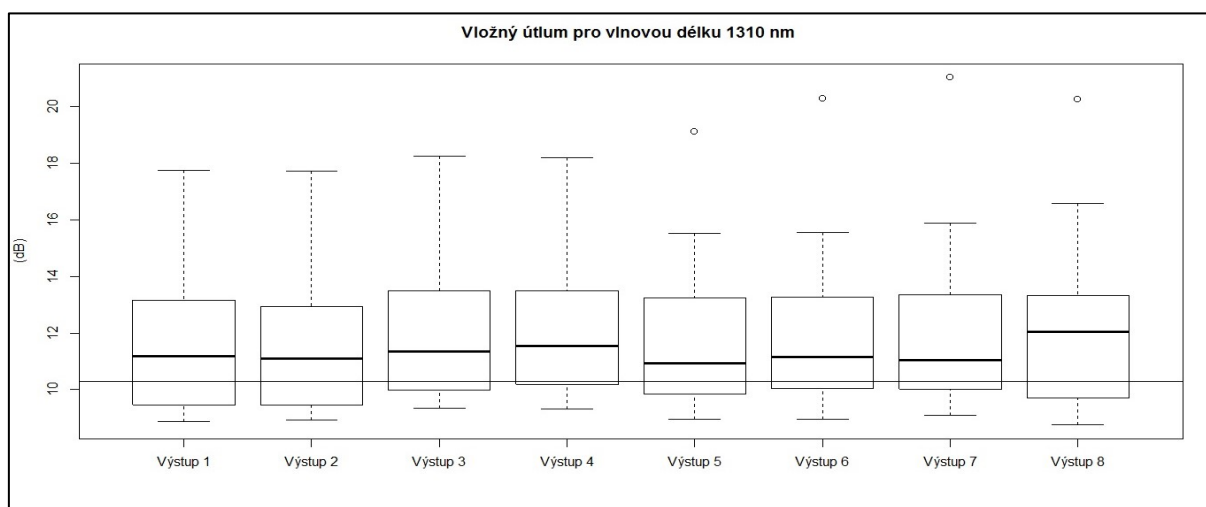
$$\text{Výstup 6: } y = 0,0000x^3 - 0,0064x^2 + 0,3482x + 7,6324 \quad R^2 = 0,4501 \quad (5.24)$$

$$\text{Výstup 7: } y = 0,0000x^3 - 0,0049x^2 + 0,3138x + 7,8161 \quad R^2 = 0,4703 \quad (5.25)$$

$$\text{Výstup 8: } y = -0,0000x^3 - 0,0020x^2 + 0,2377x + 8,0037 \quad R^2 = 0,4991 \quad (5.26)$$

	Výstup 1	Výstup 2	Výstup 3	Výstup 4	Výstup 5	Výstup 6	Výstup 7	Výstup 8
Minimum [dB]	8,859	8,914	9,353	9,302	8,954	8,943	9,088	8,745
Dolní kvartil [dB]	9,488	9,48	10,07	10,24	9,893	10,04	10,06	9,758
Medián [dB]	11,19	11,10	11,34	11,53	10,92	11,17	11,04	12,03
Průměr [dB]	11,50	11,46	11,75	11,89	11,59	11,68	11,73	11,99
Horní kvartil [dB]	13,14	12,94	13,47	13,50	13,22	13,26	13,33	13,32
Maximum [dB]	17,76	17,72	18,27	18,21	19,13	20,28	21,04	20,25
Směrodatná odchylka	1,9451	1,8372	1,8319	1,8722	2,0194	2,105	2,127	2,1754

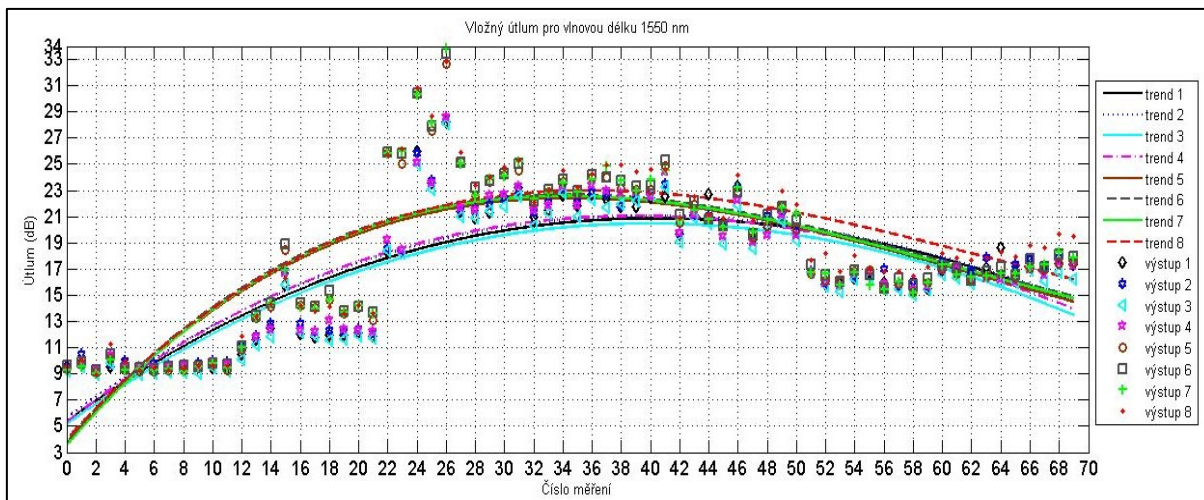
Tabulka 5.3: Explorační analýza vložných útlumů pro vlnovou délku 1310 nm (Gezhi)



Obrázek 5.6: Krabicové grafy vložných útlumů pro vlnovou délku 1310 nm (Gezhi)

I v tomto případě je v obrázku 5.6 zaznamenána přímka, která vyznačuje maximální vložný útlum. V obrázku je vyznačena hodnota maximálního vložného útlumu a to 10,3 dB. Z obrázku 5.6 a zároveň z tabulky 5.3 jsou patrné vyšší hodnoty vložných útlumů. Všechny mediány jednotlivých výstupů jsou nad hodnotou vyznačující maximální vložný útlum. Zároveň lze vidět, že pozice jednotlivých krabicových grafů je situována k této, popřípadě nad tuto hranici. Maximální hodnota vložného útlumu byla naměřena u výstupu 7, a to 21,0351 dB. Průměrně se všechny větve pohybovaly v rozmezí útlumu od 11,4553 dB do 11,9899 dB. Celkový průměr za všechna měření pro vlnovou délku 1310 nm dosahuje útlumu 11,6974 dB. Srovnáním tohoto útlumu s maximální hodnotou, která je uvedena v technické specifikaci, lze vidět zvýšení o 1,3974 dB. Porovnáním s typickým vložným útlumem je hodnota útlumu vyšší o 1,6974 dB. Je tedy patrné, že teplo negativně ovlivňuje tento parametr.

V následujícím grafu lze vidět výsledky vložného útlumu pro vlnovou délku 1550 nm u coupleru firmy Gezhi.



Obrázek 5.7: Vložné útlumy pro vlnovou délku 1550 nm (Gezhi)

Ve výsledcích vložného útlumu pro vlnovou délku 1550 nm bylo zaznamenáno velké množství zhoršených hodnot. I v tomto případě disponovaly jednotlivé výstupy při základním měření velmi nízkými hodnotami. Maximální vložný útlum byl 9,6259 dB u výstupu 6 a nejnižší hodnota útlumu dosahovala 9,1778 dB u výstupu 3. Průměr všech výstupů byl 9,4183 dB, což je o 0,5817 dB nižší než typický vložný útlum a o 0,8817 dB nižší než maximální vložný útlum. Jedná se tedy o relativně příznivé hodnoty. Ačkoliv po prvním měření útlumy vzrostly, nebyl tento nárůst tak markantní jako u vlnové délky 1310 nm. Průběh byl u téměř všech výstupů nestálý, střídalo se zlepšování a zhoršování oproti základnímu měření. Výstup 4 však byl od 3. do posledního měření zhoršen. U výstupu 2 nastal stejný vývoj od 6. měření. Od 12. do posledního měření vykazovaly již všechny výstupy zvýšené hodnoty vložného útlumu oproti základnímu měření. V rámci jednoho výstupu docházelo ke kolísání hodnot mezi naměřeným minimem a maximem až v desítkách dB. Z obrázku 5.7 lze vidět, že coupler nejprve vykazuje stoupající trend, avšak od 34. měření došlo k jeho snižování. Ukázky rovnic pro výpočty polynomů a jejich koeficient spolehlivosti (R^2) jsou zobrazeny níže.

$$\text{Výstup 1: } y = 0,0000x^3 - 0,0115x^2 + 0,8096x + 5,3573 \quad R^2 = 0,6776 \quad (5.27)$$

$$\text{Výstup 2: } y = 0,0000x^3 - 0,0121x^2 + 0,8215x + 5,6409 \quad R^2 = 0,6781 \quad (5.28)$$

$$\text{Výstup 3: } y = 0,0000x^3 - 0,0112x^2 + 0,8007x + 5,1455 \quad R^2 = 0,6831 \quad (5.29)$$

$$\text{Výstup 4: } y = 0,0000x^3 - 0,0131x^2 + 0,8614x + 5,3080 \quad R^2 = 0,6864 \quad (5.30)$$

$$\text{Výstup 5: } y = 0,0001x^3 - 0,0248x^2 + 1,2400x + 3,7498 \quad R^2 = 0,6551 \quad (5.31)$$

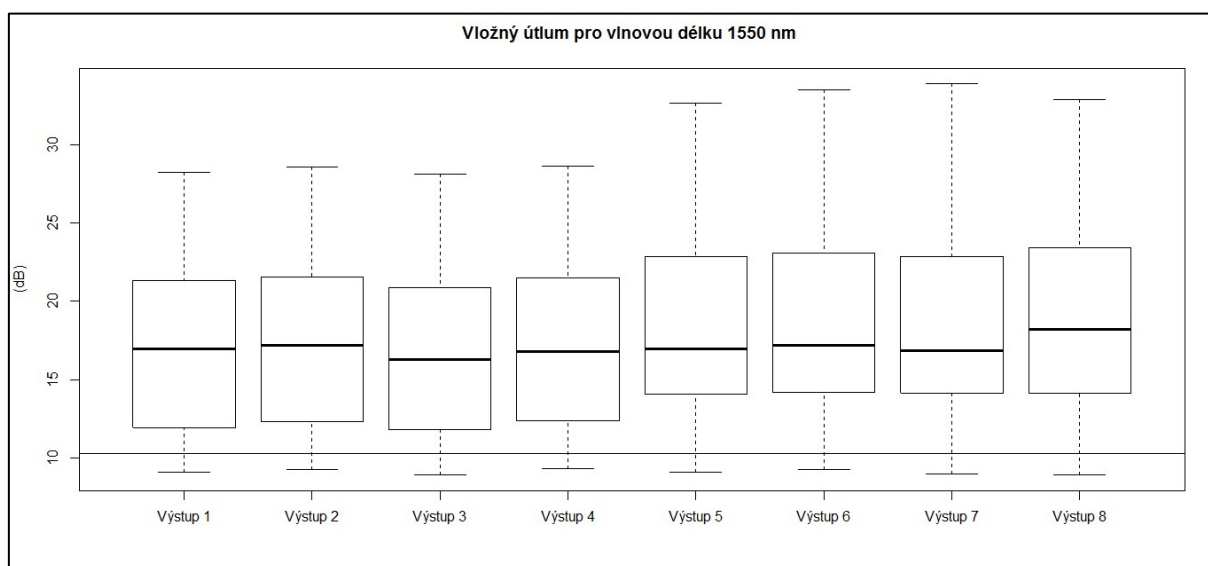
$$\text{Výstup 6: } y = 0,0001x^3 - 0,0254x^2 + 1,2572x + 3,9145 \quad R^2 = 0,6509 \quad (5.32)$$

$$\text{Výstup 7: } y = 0,0001x^3 - 0,0259x^2 + 1,2778x + 3,5493 \quad R^2 = 0,6480 \quad (5.33)$$

$$\text{Výstup 8: } y = 0,0001x^3 - 0,0236x^2 + 1,2159x + 4,0355 \quad R^2 = 0,6503 \quad (5.34)$$

	Výstup 1	Výstup 2	Výstup 3	Výstup 4	Výstup 5	Výstup 6	Výstup 7	Výstup 8
Minimum [dB]	9,116	9,249	8,897	9,321	9,084	9,27	8,992	8,929
Dolní kvartil [dB]	11,97	12,32	11,82	12,37	14,10	14,23	14,16	14,16
Medián [dB]	16,95	17,21	16,30	16,80	16,94	17,18	16,85	18,18
Průměr [dB]	16,92	17,15	16,47	17,01	17,85	18,14	17,97	18,57
Horní kvartil [dB]	21,33	21,52	20,86	21,49	22,82	23,06	22,83	23,35
Maximum [dB]	28,20	28,57	28,11	28,60	32,62	33,48	33,87	32,84
Směrodatná odchylka	4,9946	4,9363	4,9173	4,9823	5,7128	5,7445	5,827	5,8679

Tabulka 5.4: Explorační analýza vložných útlumů pro vlnovou délku 1550 nm (Gezhi)



Obrázek 5.8: Krabicové grafy vložných útlumů pro vlnovou délku 1550 nm (Gezhi)

Krabicové grafy zobrazují evidentní zhoršení hodnot vložných útlumů pro vlnovou délku 1550 nm. I v tomto případě přímka v grafu zobrazuje maximální vložný útlum, který je uveden v technické specifikaci. Několik hodnot v průběhu všech měření klesly pod tuto hranici, ty jsou vyznačeny ve vnitřních hradbách jednotlivých boxplotů (krabicových grafů). Nicméně lze vidět znatelné zvýšení mediánů vložného útlumu pro jednotlivé výstupy. Z explorační analýzy (tabulka 5.4) lze vyčíst několik podstatných informací. Nejvyšší vložný útlum byl zaznamenán u výstupu 7, a to 33,8691 dB. Jak již bylo výše zmíněno, rozdíly mezi maximálním a minimálním vložným útlumem dosahovaly až desítek dB. Konkrétně v tomto případě se jednalo o hodnotu 24,8771 dB mezi naměřeným maximem a minimem. U vlnové délky 1550 nm nabýval průměrně vložný útlum hodnoty 17,5105 dB za všechna měření. Tento výsledek lze považovat za velmi neuspokojivý. Nárůst vložného útlumu je znatelný. Průměrná hodnota je o 7,2105 dB vyšší, než je vykazována u typického vložného útlumu. Porovnáním s maximálním vložným útlumem toto číslo ještě vzroste na hodnotu 7,5105 dB. Závěrem je možné říci, že teplo negativně ovlivňuje tento parametr. Zhoršení je u této vlnové délky znatelnější, než tomu bylo u 1310 nm.

5.3 Celkové ztráty

Tento parametr určuje, jak vysoké jsou ztráty samotného coupleru. V ideálním případě by se tato hodnota měla rovnat 0 dB, nicméně v praxi není možné takto perfektní coupler vyrobit, a proto se hodnoty pohybují zpravidla okolo 1 dB. Hodnota celkových ztrát (Total Losses) se určuje výpočtem z obecné rovnice 5.35 [15].

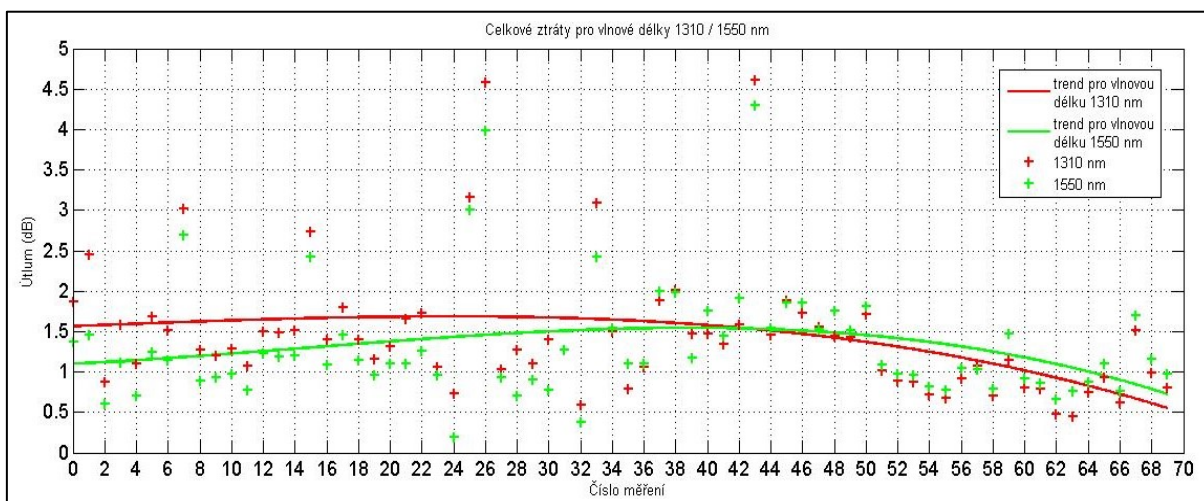
$$TL = -10 \times \log \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8}{P_0} \text{ [dB]} \quad (5.35)$$

Pro praktickou ukázkou výpočtu této rovnice (5.36) bylo vybráno základní měření u vlnové délky 1310 nm (coupler firmy Optokon), kde $P_0(2680 \mu\text{W})$ je výkon, který vstupoval do coupleru, a P_1 až P_8 jsou výkony, jež z coupleru vystupovaly.

$$TL = -10 \times \log \frac{220+211+224+213+228+188+215+204}{2680} = 1,9692 \text{ dB} \quad (5.36)$$

5.3.1 Celkové ztráty coupleru Optokon

Kapitola obsahuje výsledky naměřených a graficky znázorněných celkových ztrát pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm u coupleru Optokon.



Obrázek 5.9: Celkové ztráty pro vlnové délky 1310 a 1550 nm (Optokon)

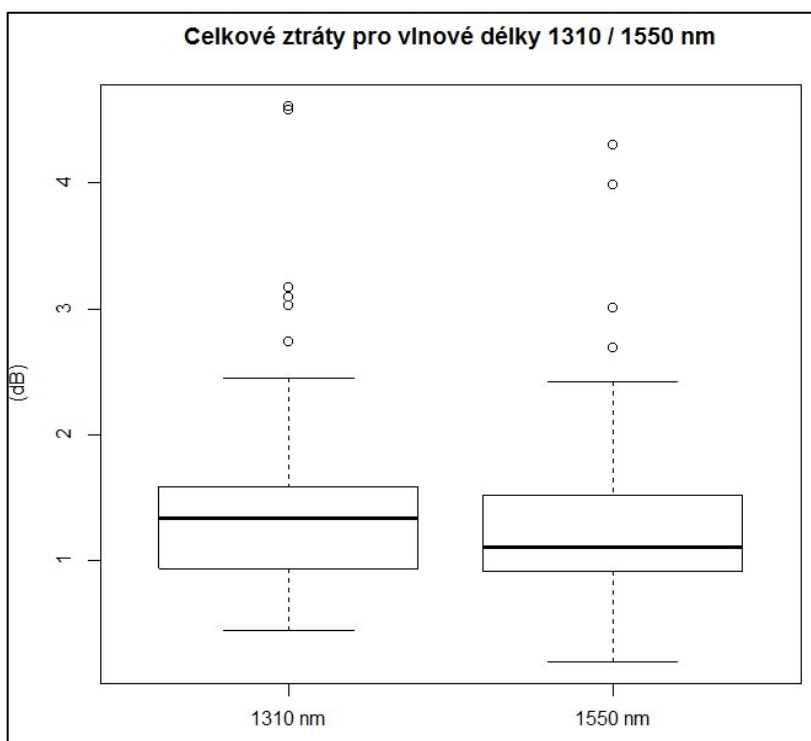
Celkové ztráty v základním měření byly poměrně vysoké. Vlnová délka 1310 nm disponovala hodnotou 1,8734 dB a pro vlnovou délku 1550 nm to bylo 1,3682 dB. Tyto hodnoty byly velice překvapivé, jelikož v mnoha případech se celkové ztráty pohybují jen do 1 dB. Jakmile začal být coupler tepelně namáhán, došlo dle očekávání po prvním měření k nárůstu celkových ztrát u obou vlnových délek. V dalším měření se hodnoty snížily a pohybovaly se okolo 1 dB. Na obrázku 5.9 je zachycen proměnlivý průběh celkových ztrát. U vlnové délky 1310 nm je toto kolísání méně patrné. Trendy pro obě vlnové délky mají klesající charakter, lze tedy říct, že teplo pozitivně ovlivňuje celkové ztráty. Následují ukázky rovnic pro výpočty polynomů a jejich koeficient spolehlivosti (R^2).

$$\lambda = 1310 \text{ nm} = -0,0000x^3 + 0,0000x^2 + 0,0074x + 1,5654 \quad R^2 = 0,1572 \quad (5.37)$$

$$\lambda = 1550 \text{ nm} = -0,0000x^3 + 0,0004x^2 + 0,0094x + 1,1011 \quad R^2 = 0,0817 \quad (5.38)$$

<i>Vlnová délka</i>	<i>1310 nm</i>	<i>1550 nm</i>
<i>Minimum [dB]</i>	0,4452	0,1968
<i>Dolní kvartil [dB]</i>	0,9483	0,9131
<i>Medián [dB]</i>	1,333	1,109
<i>Průměr [dB]</i>	1,442	1,32
<i>Horní kvartil [dB]</i>	1,584	1,519
<i>Maximum [dB]</i>	4,607	4,3
<i>Směrodatná odchylka</i>	0,7895	0,7073

Tabulka 5.5: Explorační analýza celkových ztrát (Optokon)



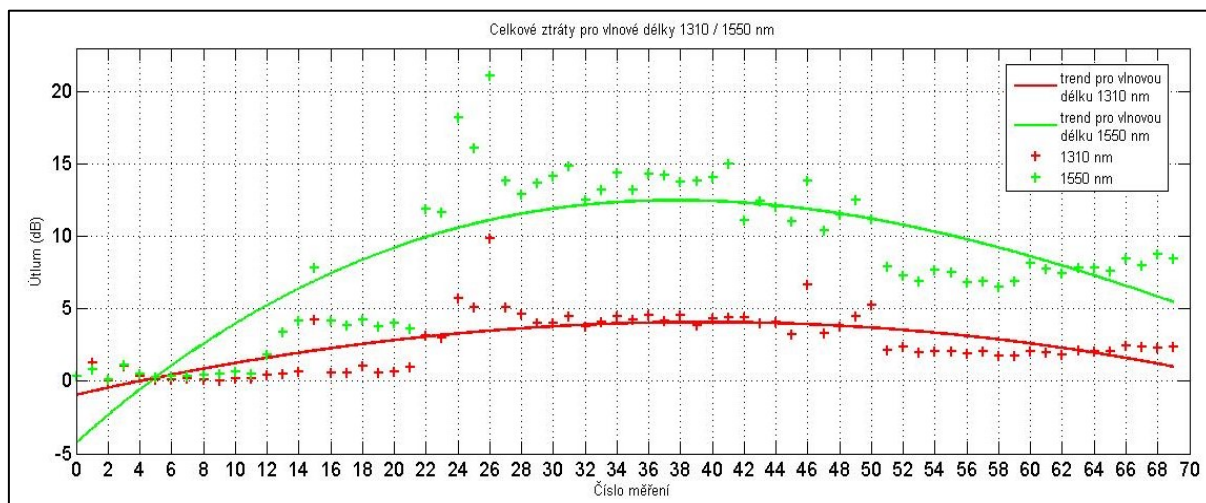
Obrázek 5.10: Krabicové grafy celkových ztrát (Optokon)

Z obrázku 5.10 pro celkové ztráty je zřejmé, že průměr ztrát pro jednotlivé vlnové délky dosahuje hodnot, jež nejsou v praxi ničím zvláštní. Nejvyšší ztráty u vlnové délky 1310 nm byly 4,6070 dB a nejnižší 0,4452 dB, což je velice příznivé. Od 46. měření do posledního měření byly celkové ztráty nižší oproti novému coupleru. Průměrně se celkové ztráty u vlnové délky 1310 nm pohybovaly okolo 1,4415 dB.

Naopak vlnová délka 1550 nm častěji dosahovala vyšších hodnot celkových ztrát oproti základnímu měření. Nejnižší ztráty byly zaznamenány v první polovině všech měření a to 0,1968 dB. I tuto hodnotu lze považovat za velmi dobrou. Nejvyšší hodnota celkových ztrát byla změřena ve 43. měření a rovnala se 4,3004 dB. Průměrně se celkové ztráty pohybovaly okolo 1,3202 dB.

5.3.2 Celkové ztráty coupleru Gezhi

V této podkapitole jsou uvedeny výsledky měření celkových ztrát coupleru Gezhi pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm, včetně grafického znázornění.



Obrázek 5.11: Celkové ztráty pro vlnové délky 1310 a 1550 nm (Gezhi)

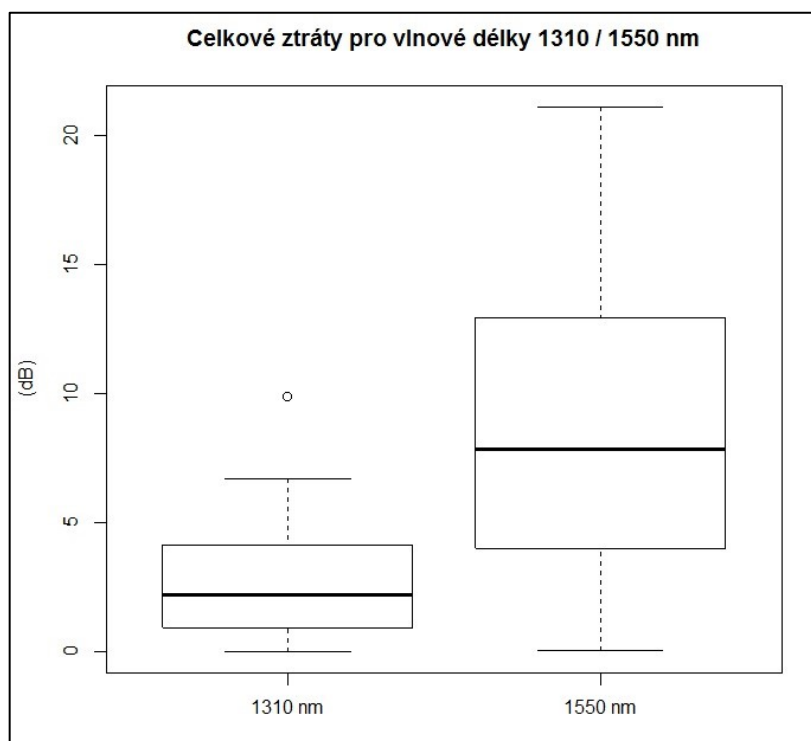
Celkové ztráty u nového coupleru byly dle očekávání velmi nízké. Pro vlnovou délku 1310 nm se jednalo o 0,3304 dB a u vlnové délky 1550 nm byla hodnota ztrát 0,3806 dB. Poté začal být coupler tepelně namáhán a celkové ztráty vzrostly. Ovšem ve druhém měření došlo k překvapivému úkazu, a to dosažení minimální hodnoty u obou vlnových délek. U vlnové délky 1310 nm činilo minimum 0,0251 dB a pro vlnovou délku 1550 nm 0,0736 dB. Další průběh celkových ztrát byl i u tohoto coupleru kolísavý. Od 8. měření začaly ztráty nabývat vyšších hodnot u 1550 nm. Jakmile dosáhly maxima, začaly opět pozvolna klesat, ačkoliv se už k původním hodnotám nepřiblížily. Tato situace nastala i u vlnové délky 1310 nm, a to přesněji od 12. měření, nicméně ztráty u této délky nedosahovaly tak vysokých hodnot jako u 1550 nm. Z obrázku 5.11 lze vidět, že trend vlnové délky 1310 nm má sice klesající tendenci, která nepřekročila hranici 5 dB, ale trend pro vlnovou délku 1550 nm disponuje vyšším obloukem, nicméně také klesajícím trendem. Ukázky rovnic pro výpočty polynomů a jejich koeficient spolehlivosti (R^2) jsou zaznamenány níže.

$$\lambda = 1310 \text{ nm} = -0,0000x^3 - 0,0029x^2 + 0,2482x - 0,9390 \quad R^2 = 0,5022 \quad (5.39)$$

$$\lambda = 1550 \text{ nm} = 0,0001x^3 - 0,0169x^2 + 0,9842x - 4,2575 \quad R^2 = 0,6787 \quad (5.40)$$

Vlnová délka	1310 nm	1550 nm
Minimum [dB]	0,0251	0,0736
Dolní kvartil [dB]	0,9548	4,054
Medián [dB]	2,213	7,871
Průměr [dB]	2,638	8,349
Horní kvartil [dB]	4,124	12,83
Maximum [dB]	9,877	21,09
Směrodatná odchylka	1,9336	5,2207

Tabulka 5.6: Explorační analýza celkových ztrát (Gezhi)



Obrázek 5.12: Krabicové grafy celkových ztrát (Gezhi)

Z obrázku 5.12 lze vidět, že se mediány celkových ztrát pohybují poměrně vysoko. Tomu odpovídají i maximální hodnoty, jež byly změřeny. Příkladem jsou maximální ztráty, které pro vlnovou délku 1310 nm vykazovaly ve 26. měření hodnotu 9,8767 dB. Maximální celkové ztráty, které byly zjištěny u 1550 nm, dosahovaly mnohem vyšších čísel. Ve 26. měření byla hodnota celkových ztrát 21,0937 dB. Celkové ztráty se v praxi pohybují okolo 1 dB. Nicméně průměry za všechna měření poukazují na mnohonásobné překročení této hranice. Průměrné celkové ztráty u vlnové délky 1310 nm dosahovaly 2,6379 dB a u 1550 nm 8,3495 dB. Takto vysoké hodnoty jsou negativním faktorem, jenž může mít špatný dopad na fungování sítě.

5.4 Homogenita ztrát

Tato podkapitola je zaměřena na homogenitu ztrát (Homogeneity Losses), která se získává odečtením dvou hodnot, a to maximálního a minimálního vložného útlumu. Výsledná hodnota by měla být velmi malá a je udávána v dB. Postup výpočtu lze vidět v rovnici 5.41 [15].

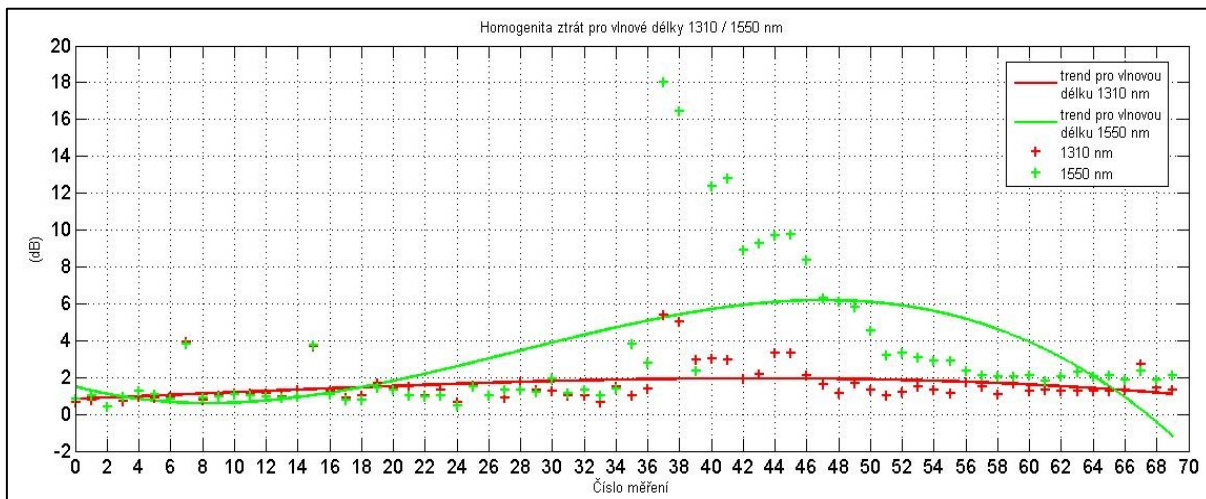
$$HL = MAX_{\text{vložný útlum vyst.1-8}} - MIN_{\text{vložný útlum vyst.1-8}} [dB] \quad (5.41)$$

I v tomto případě bylo pro praktickou ukázkou výpočtu rovnice (5.41) vybráno základní měření s vlnovou délkou 1310 nm (coupler firmy Optokon). Maximální vložný útlum se v tomto případě nacházel u výstupu 6 a minimální u výstupu 5. Výsledný předpis rovnice je možné vidět v následující rovnici.

$$HL = 11,5397 - 10,702 = 0,8377 \text{ dB} \quad (5.42)$$

5.4.1 Homogenita ztrát Optokon

V této podkapitole jsou zaznamenány výsledky měření homogenit ztrát u coupleru Optokon pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm včetně grafického znázornění.



Obrázek 5.13: Homogenita ztrát pro vlnové délky 1310 a 1550 nm (Optokon)

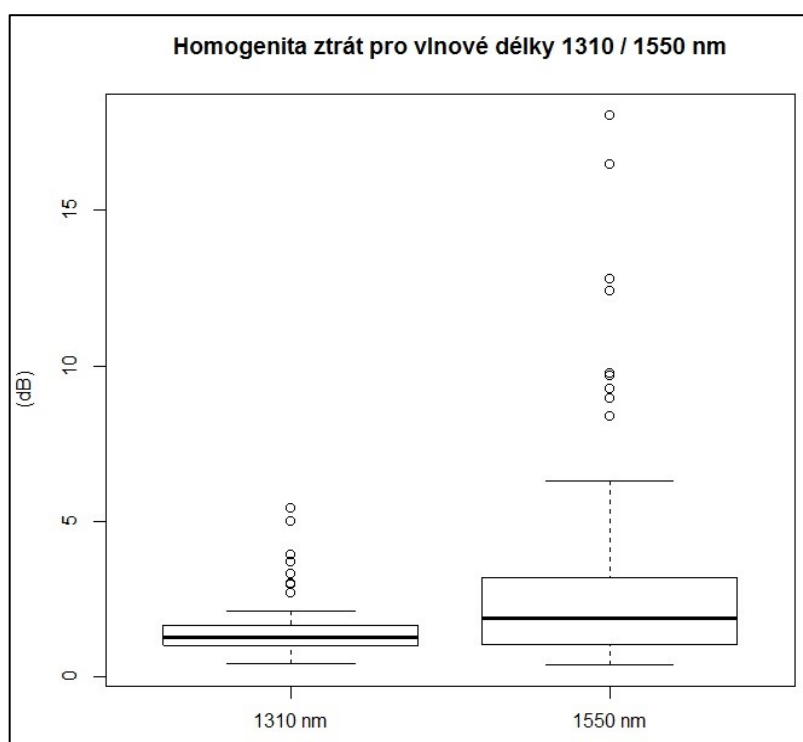
V základním měření byla homogenita pod hranicí 1 dB. Pro vlnovou délku 1310 nm nabýval tento parametr hodnoty 0,6282 dB a u vlnové délky 1550 nm 0,8401 dB. Jakmile započalo tepelné namáhání coupleru, tak v souladu s očekáváním vzrostly hodnoty ztrát. Tento nárůst se pohyboval do 0,19 dB. Ve druhém měření došlo ke snížení ztrát, a to na jejich minimální úroveň. Následně bylo u obou vlnových délek zaznamenáno zvýšení homogenity ztrát oproti základnímu měření. Z obrázku 5.13 lze vyčíst klesající trend u obou vlnových délek. Je patrné, že u trendu pro vlnovou délku 1550 nm je pokles větší, jelikož zde byly naměřeny několikanásobně zvýšené hodnoty. Ukázky rovnic pro výpočty polynomů a jejich koeficient spolehlivosti (R^2) jsou zapsány níže.

$$\lambda = 1310 \text{ nm} = -0,0000x^3 + 0,0002x^2 + 0,0346x + 0,8309 \quad R^2 = 0,1182 \quad (5.43)$$

$$\lambda = 1550 \text{ nm} = -0,0002x^3 + 0,0160x^2 - 0,2277x + 1,4935 \quad R^2 = 0,3345 \quad (5.44)$$

Vlnová délka	1310 nm	1550 nm
Minimum [dB]	0,4195	0,4123
Dolní kvartil [dB]	1,017	1,035
Medián [dB]	1,285	1,897
Průměr [dB]	1,565	3,205
Horní kvartil [dB]	1,645	3,155
Maximum [dB]	5,406	18,05
Směrodatná odchylka	0,968	3,7205

Tabulka 5.7: Explorační analýza homogenity ztrát (Optokon)

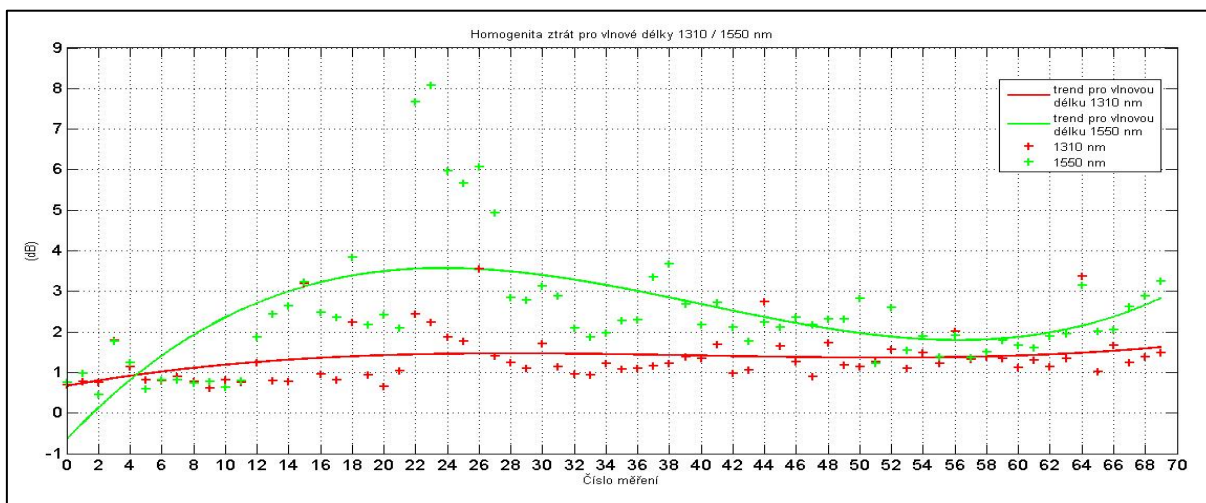


Obrázek 5.14: Krabicové grafy homogenity ztrát (Optokon)

Krabicový graf pro vlnovou délku 1310 nm ukazuje velmi malý rozsah naměřených hodnot. Minimální ztráty u této délky byly 0,4195 dB a lze je považovat za příznivý výsledek. Naopak maximální ztráty dosahují 5,4065 dB, což je negativním zjištěním. Pro vlnovou délku 1550 nm jsou minimální ztráty rovny 0,4123 dB a opětovně se jedná o dobrou hodnotu. Nicméně z naměřených výsledků je patrné, že maximální hodnota homogenity ztrát je velice vysoká, a to 18,0469 dB. Za všechna měření byl průměr homogenity ztrát 1,5651 dB pro 1310 nm a 3,2046 dB pro 1550 nm. Z těchto výsledků je možné usoudit, že teplo negativně ovlivňuje měřený parametr.

5.4.2 Homogenita ztrát Gezhi

Tato podkapitola je věnována výsledkům homogenity ztrát pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm u coupleru Gezhi.



Obrázek 5.15: Homogenita ztrát pro vlnové délky 1310 a 1550 nm (Gezhi)

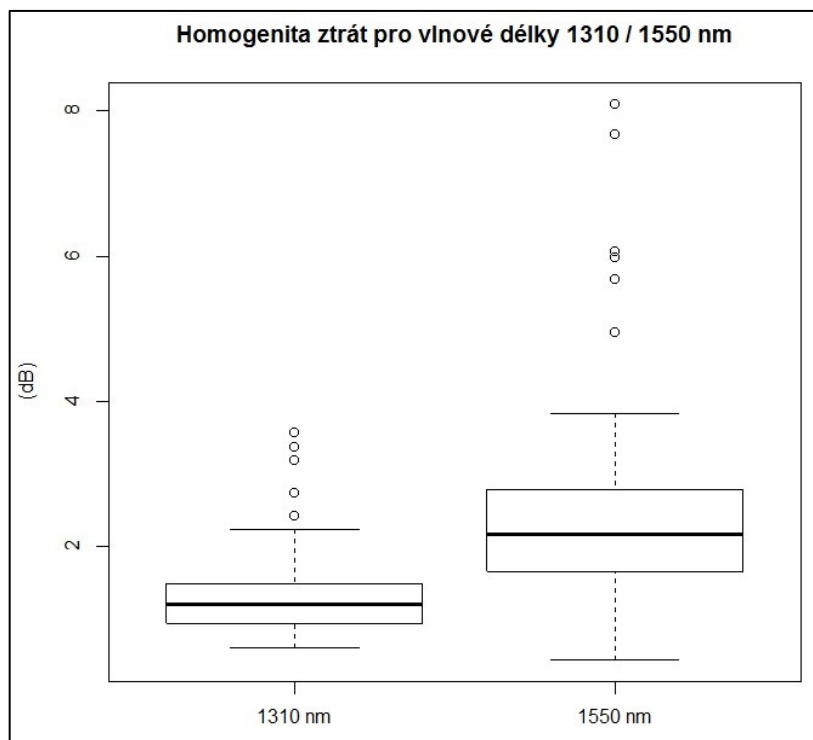
Homogenita ztrát při základním měření u tohoto coupleru dosahovala podobných hodnot jako u Optokonu. Jednalo se o 0,6988 dB u vlnové délky 1310 nm a 0,7598 dB pro 1550 nm. V porovnání s Optokonem však bylo u tohoto coupleru vykazováno více zhoršených výsledků. Zlepšení hodnot u vlnové délky 1310 nm nastalo za dobu celého měření jen dvakrát. Ztráty u vlnové délky 1550 nm měly podobný charakter. Konkrétně 4krát nastalo zlepšení oproti základnímu měření, nicméně od 11. až do posledního měření ztráty vykazovaly zhoršených hodnot. Z obrázku 5.15 je patrný stoupající trend u obou vlnových délek. Lze tedy říct, že teplo negativně ovlivňuje tento měřený parametr. Ukázky rovnic pro výpočty polynomů a jejich koeficient spolehlivosti (R^2) lze vidět níže.

$$\lambda = 1310 \text{ nm} = 0,0000x^3 - 0,0019x^2 + 0,0701x + 0,6658 \quad R^2 = 0,1024 \quad (5.45)$$

$$\lambda = 1550 \text{ nm} = 0,0001x^3 - 0,0124x^2 + 0,4142x - 0,6522 \quad R^2 = 0,3883 \quad (5.46)$$

Vlnová délka	1310 nm	1550 nm
Minimum [dB]	0,6152	0,4515
Dolní kvartil [dB]	0,9504	1,686
Medián [dB]	1,216	2,17
Průměr [dB]	1,346	2,422
Horní kvartil [dB]	1,487	2,77
Maximum [dB]	3,561	8,087
Směrodatná odchylka	0,6066	1,4804

Tabulka 5.8: Explorační analýza homogenity ztrát (Gezhi)



Obrázek 5.16: Krabicové grafy homogenity ztrát (Gezhi)

I zde je k vidění boxplot pro 1310 nm, který je charakteristický menším rozsahem naměřených hodnot. Průměrné ztráty za všechna měření dosahují 1,3458 dB, což je v porovnání s Optokonem nižší hodnota. Maximální homogenita ztrát byla zaznamenána téměř v polovině všech měření na úrovni 3,5616 dB. Minimální ztráty pro délku 1310 nm dosahovaly 0,6152 dB.

Z boxplotu pro vlnovou délku 1550 nm je patrný větší rozsah hodnot. Průměrné hodnoty ztrát byly ve výši 2,4224 dB. V porovnání s Optokonem dosáhl Gezhi o téměř 1 dB nižší hodnoty. Maximální zaznamenaná homogenita ztrát byla 8,0870 dB.

5.5 Dělicí poměr

Tento parametr udává, v jakém poměru coupler rozděluje výkon, který je dodáván do vstupu mezi jednotlivé výstupy. Výsledky jsou uváděny v %. V této práci byly měřeny couplery s jedním vstupem a osmi výstupy (1:8). Oba couplery pracují v symetrickém režimu. Teoreticky by měl každý výstup dosahovat hodnoty 12,5 %. Jejich součet tedy musí být roven 100 %. Obecná rovnice 5.47 udává výpočet dělicího poměru (Split ratio) [15].

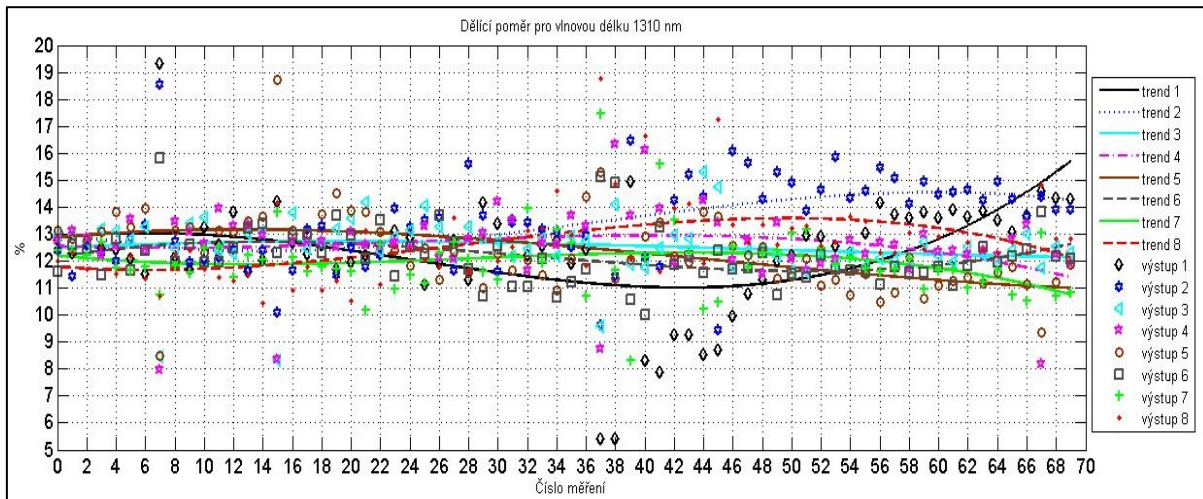
$$SR = \frac{P_1}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8} \times 100 [\%] \quad (5.47)$$

I u tohoto parametru bylo pro praktickou ukázkou výpočtu dělicího poměru vybráno základní měření. P_1 až P_8 jsou výkony, které byly naměřeny. Ukázka 5.48 je vztažena ke coupleru firmy Optokon s vlnovou délkou 1310 nm a jedná se o výpočet prvního výstupu.

$$SR = \frac{220}{220 + 211 + 224 + 213 + 228 + 188 + 215 + 204} \times 100 = 12,9183 \% \quad (5.48)$$

5.5.1 Dělicí poměr coupleru Optokon

V první části této podkapitoly jsou popsány výsledky dělicího poměru s vlnovou délkou 1310 nm. Následně jsou shrnuty naměřené hodnoty pro vlnovou délku 1550 nm. Vše je doprovázeno grafickým zobrazením.



Obrázek 5.17: Dělicí poměry pro vlnovou délku 1310 nm (Optokon)

Jak již bylo výše napsáno, dle teoretických východisek by každý výstup měl disponovat dělicím poměrem o velikosti 12,5 %. Měřením nového coupleru pro vlnovou délku 1310 nm bylo zjištěno, že u pěti výstupů se dělicí poměr pohyboval kolem zmíněné teoretické hodnoty. Nejblíže se této hodnotě přiblížil výstup 2, jehož dělicí poměr byl 12,3797 %. Naopak nejvzdálenější hodnota byla zaznamenána u výstupu 6, kde dělicí poměr byl roven 11,6069 %. V obrázku 5.17, lze vidět trendy jednotlivých výstupů, ze kterých jsou patrné kolísavé hodnoty. U tohoto parametru je však pravidlem, že snížení dělicího poměru na jednom výstupu způsobí zvýšení tohoto parametru na jiném výstupu. Sečtením poměrů u všech výstupů je rovno 100 %. Ukázky rovnic pro výpočty polynomů a jejich koeficient spolehlivosti (R^2) jsou zobrazeny níže.

$$\text{Výstup 1: } y = 0,0001x^3 - 0,0061x^2 + 0,0646x + 12,8529 \quad R^2 = 0,2689 \quad (5.49)$$

$$\text{Výstup 2: } y = -0,0000x^3 + 0,0050x^2 - 0,1122x + 13,0903 \quad R^2 = 0,255 \quad (5.50)$$

$$\text{Výstup 3: } y = 0,0000x^3 - 0,0009x^2 + 0,0277x + 12,4798 \quad R^2 = 0,0302 \quad (5.51)$$

$$\text{Výstup 4: } y = -0,0000x^3 + 0,0018x^2 - 0,0218x + 12,5538 \quad R^2 = 0,0661 \quad (5.52)$$

$$\text{Výstup 5: } y = 0,0000x^3 - 0,0023x^2 + 0,0488x + 12,8811 \quad R^2 = 0,269 \quad (5.53)$$

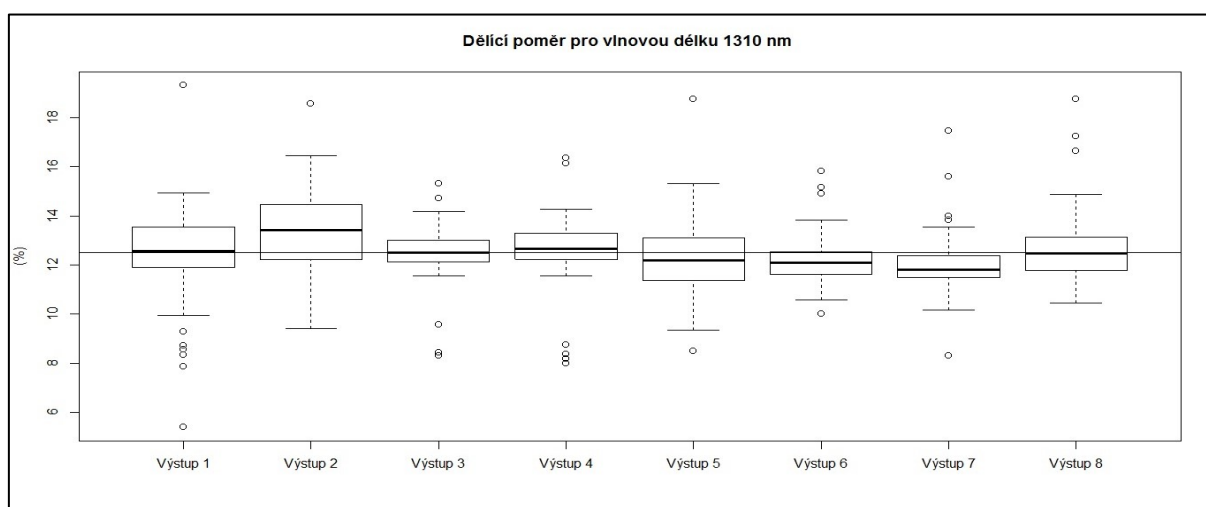
$$\text{Výstup 6: } y = 0,0000x^3 - 0,0041x^2 + 0,0905x + 12,1434 \quad R^2 = 0,1425 \quad (5.54)$$

$$\text{Výstup 7: } y = -0,0000x^3 + 0,0027x^2 - 0,0549x + 12,2025 \quad R^2 = 0,078 \quad (5.55)$$

$$\text{Výstup 8: } y = -0,0000x^3 + 0,0039x^2 - 0,0426x + 11,7964 \quad R^2 = 0,2369 \quad (5.56)$$

	<i>Výstup 1</i>	<i>Výstup 2</i>	<i>Výstup 3</i>	<i>Výstup 4</i>	<i>Výstup 5</i>	<i>Výstup 6</i>	<i>Výstup 7</i>	<i>Výstup 8</i>
Minimum [dB]	5,392	9,426	8,30	7,976	8,485	10,01	8,302	10,45
Dolní kvartil [dB]	11,91	12,25	12,14	12,23	11,37	11,61	11,51	11,80
Medián [dB]	12,57	13,43	12,50	12,67	12,20	12,09	11,81	12,47
Průměr [dB]	12,30	13,42	12,52	12,59	12,35	12,19	11,97	12,68
Horní kvartil [dB]	13,53	14,44	13,02	13,25	13,12	12,54	12,38	13,14
Maximum [dB]	19,31	18,57	15,31	16,35	18,74	15,82	17,46	18,76
Směrodatná odchylka	2,0786	1,6285	1,0848	1,3562	1,4364	1,0195	1,2087	1,4269

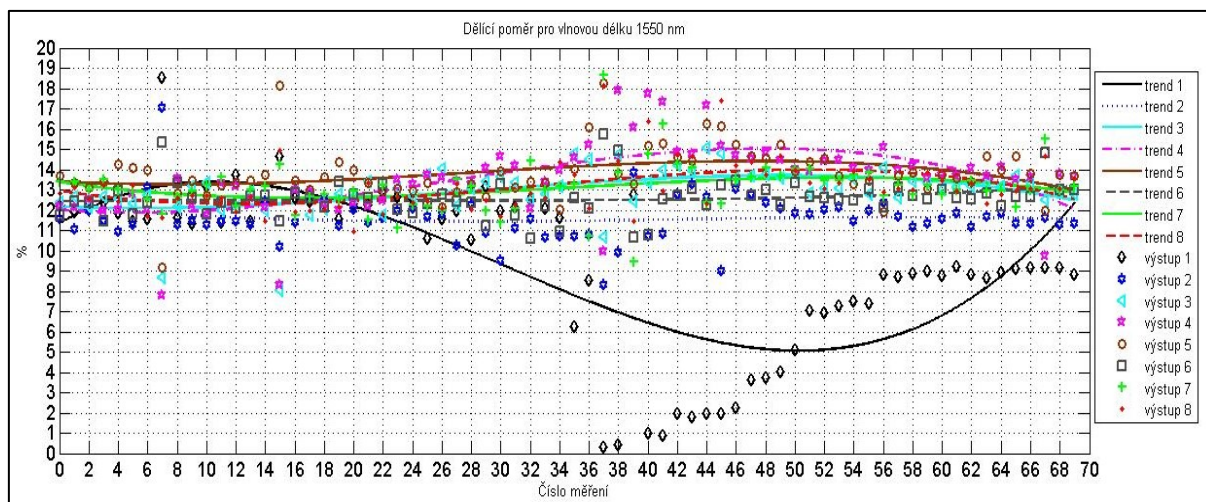
Tabulka 5.9: Explorační analýza dělicích poměrů pro vlnovou délku 1310 nm (Optokon)



Obrázek 5.18: Krabicové grafy dělicích poměrů pro vlnovou délku 1310 nm (Optokon)

Na obrázku 5.18 je vyznačena přímka, jež reprezentuje hodnotu 12,5 %. Lze vidět, že se kolem této hodnoty téměř všechny výstupy pohybovaly. Pouze u dvou výstupů se medián dělicích poměrů trochu lehce vychýlil. Z explorační analýzy je patrné, že se nejbližší k hodnotě 12,5 % přiblížily dva výstupy 3 a 8. Výstup 3 nabýval 12,5 % a výstup 8 dosahoval 12,4737 %. Nejnížší dělicí poměr byl zaznamenán u výstupu 1 a to 5,3916 %. Stejný výstup také vykazoval nejvyšší dělicí poměr s hodnotou 19,3068 %.

U vlnové délky 1550 nm byly zaznamenány kolísavější průběhy dělicího poměru.



Obrázek 5.19: Dělicí poměry pro vlnovou délku 1550 nm (Optokon)

V základním měření bylo zjištěno, že interval 12–13 % byl charakteristický pro čtyři výstupy. Po celou dobu měření se toto rozmezí vyskytovalo nejčastěji u výstupu 6 a 7. U ostatních výstupů bylo zjištěno, že jejich poměry nabývaly vyšších či nižších hodnot. I u této vlnové délky jsou součty všech poměrů za jedno měření rovny 100 %. Na obrázku 5.19 lze vidět méně proměnlivé trendy u téměř všech výstupů. Nejvíce kolísavý byl trend u výstupu 1, který byl způsoben častým výskytem nízkých hodnot dělicího poměru. Rovnice pro výpočty polynomů a jejich koeficient spolehlivosti (R^2) je možné vidět níže.

$$\text{Výstup 1: } y = 0,0003x^3 - 0,0241x^2 + 0,4172x + 11,3581 \quad R^2 = 0,5686 \quad (5.57)$$

$$\text{Výstup 2: } y = -0,0000x^3 + 0,0020x^2 - 0,0719x + 12,2490 \quad R^2 = 0,0252 \quad (5.58)$$

$$\text{Výstup 3: } y = -0,0000x^3 + 0,0031x^2 - 0,0289x + 12,1704 \quad R^2 = 0,2701 \quad (5.59)$$

$$\text{Výstup 4: } y = -0,0001x^3 + 0,0064x^2 - 0,0602x + 12,0270 \quad R^2 = 0,4249 \quad (5.60)$$

$$\text{Výstup 5: } y = -0,0000x^3 + 0,0032x^2 - 0,0447x + 13,4290 \quad R^2 = 0,1162 \quad (5.61)$$

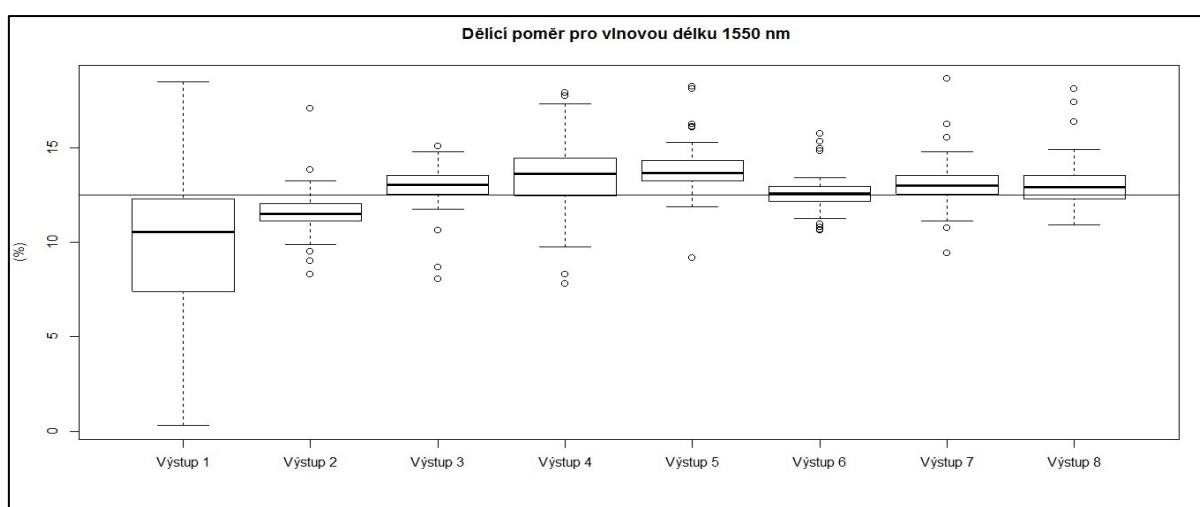
$$\text{Výstup 6: } y = 0,0000x^3 - 0,0004x^2 + 0,0087x + 12,4266 \quad R^2 = 0,0432 \quad (5.62)$$

$$\text{Výstup 7: } y = -0,0000x^3 + 0,0042x^2 - 0,1060x + 13,3851 \quad R^2 = 0,081 \quad (5.62)$$

$$\text{Výstup 8: } y = -0,0001x^3 + 0,0057x^2 - 0,1142x + 12,9548 \quad R^2 = 0,2291 \quad (5.63)$$

	<i>Výstup 1</i>	<i>Výstup 2</i>	<i>Výstup 3</i>	<i>Výstup 4</i>	<i>Výstup 5</i>	<i>Výstup 6</i>	<i>Výstup 7</i>	<i>Výstup 8</i>
Minimum [dB]	0,2996	8,32	8,031	7782	9,18	10,61	9,429	10,93
Dolní kvartil [dB]	7,427	11,17	12,56	12,49	13,27	12,19	12,58	12,32
Medián [dB]	10,56	11,52	13,05	13,64	13,68	12,58	13,01	12,94
Průměr [dB]	9,285	11,61	12,96	13,52	13,81	12,59	13,11	13,13
Horní kvartil [dB]	12,27	12,02	13,54	14,39	14,33	12,97	13,54	13,54
Maximum [dB]	18,51	17,07	15,07	17,92	18,26	15,73	18,65	18,12
Směrodatná odchylka	3,9997	1,1306	1,1237	1,7602	1,2905	0,9065	1,2195	1,2641

Tabulka 5.10: Explorační analýza dělicích poměrů pro vlnovou délku 1550 nm (Optokon)

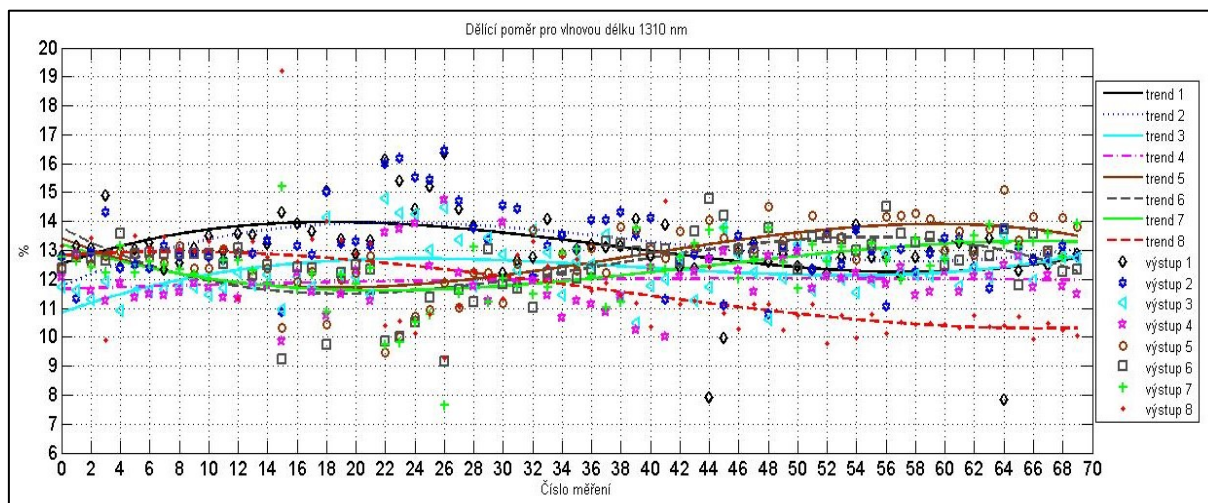


Obrázek 5.20: Krabicové grafy dělicích poměrů pro vlnovou délku 1550 nm (Optokon)

V obrázku 5.20 je opět zaznamenána teoretická hodnota 12,5 %, s jejíž pomocí lze přehledněji sledovat vývoj naměřených hodnot. Krabicový graf pro první výstup má větší rozestup hradeb, z čehož vyplývá, že rozsah hodnot mezi maximem a minimem je velký. Průměr u tohoto výstupu dosahoval pouze 9,2850 %, což se odráží na zvýšeném vložném útlumu, jenž byl popsán výše. Navíc zde byl zaznamenán i nejnižší dělicí poměr, a to 0,2996 %. V podstatě se dá říci, že v této větvi nebyl téměř žádný výkon. Nejvyšší dělicí poměr byl naměřen u výstupu 7, a to v hodnotě 18,6492 %. Současně byl u tohoto výstupu zjištěn velmi nízký vložený útlum 9,2950 dB. Dle naměřených hodnot mezi dělicím poměrem a vloženým útlumem existuje nepřímý vztah. K teoretickému poměru 12,5 % se přiblížily pouze dva výstupy. Výstup 6 s dělicí poměrem 12,5847 % a výstup 8 s hodnotou 12,9410 %. Ostatní výstupy dosahovaly vyššího, popřípadě nižšího poměru.

5.5.2 Dělicí poměr coupleru Gezhi

Obsahem této podkapitoly je shrnutí výsledků měření dělicího poměru u coupleru firmy Gezhi pro vlnové délky 1310 nm a následně 1550 nm. Tyto výsledky jsou i graficky znázorněny.



Obrázek 5.21: Dělicí poměry pro vlnovou délku 1310 nm (Gezhi)

Tento coupler dosahoval v porovnání s Optokonem příznivějších výsledků dělicího poměru. Již z obrázku 5.21 je patrné, že hodnoty se častěji vyskytují kolem 12 %. Tomu odpovídají i naměřené hodnoty, které se velmi často nacházely v intervalu od 12 do 13 %. I v tomto případě se celkový dělicí poměr za jednotlivá měření rovnal 100 %. V základním měření se téměř všechny výstupy (výjimkou byly výstupy 3 a 8) pohybovaly v rozmezí 12–13 %. U výstupu 8 byla zjištěna hodnota 13,1634 % a u výstupu 3 to bylo 11,7044 %. Na obrázku 5.21 jsou trendy u všech výstupů poměrně proměnlivé. Rovnice pro výpočty polynomů a jejich koeficient spolehlivosti (R^2) jsou zobrazeny níže.

$$\text{Výstup 1: } y = 0,0001x^3 - 0,0064x^2 + 0,1781x + 12,5258 \quad R^2 = 0,2236 \quad (5.64)$$

$$\text{Výstup 2: } y = 0,0001x^3 - 0,0070x^2 + 0,2270x + 11,7548 \quad R^2 = 0,2302 \quad (5.65)$$

$$\text{Výstup 3: } y = 0,0000x^3 - 0,0055x^2 + 0,1825x + 10,8374 \quad R^2 = 0,1978 \quad (5.66)$$

$$\text{Výstup 4: } y = 0,0000x^3 - 0,0002x^2 + 0,0166x + 11,6634 \quad R^2 = 0,0152 \quad (5.67)$$

$$\text{Výstup 5: } y = -0,0001x^3 + 0,0074x^2 - 0,2081x + 13,4156 \quad R^2 = 0,5395 \quad (5.68)$$

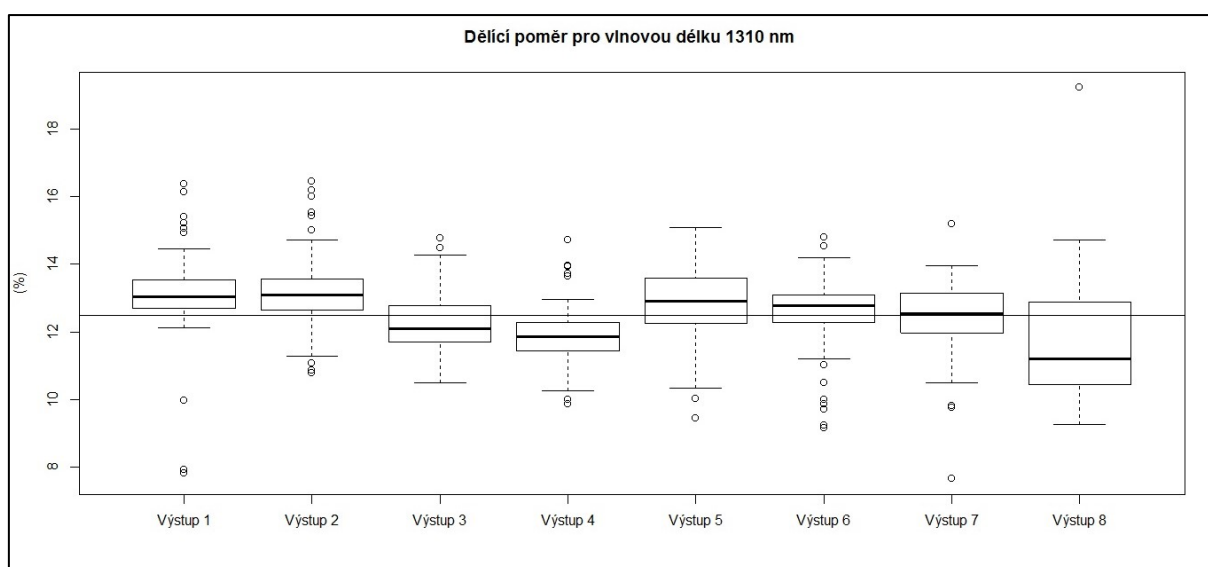
$$\text{Výstup 6: } y = -0,0001x^3 + 0,0096x^2 - 0,2702x + 13,7785 \quad R^2 = 0,4051 \quad (5.69)$$

$$\text{Výstup 7: } y = -0,0000x^3 + 0,0051x^2 - 0,1653x + 13,2081 \quad R^2 = 0,2963 \quad (5.70)$$

$$\text{Výstup 8: } y = 0,0000x^3 - 0,0029x^2 + 0,0395x + 12,8164 \quad R^2 = 0,3911 \quad (5.71)$$

	<i>Výstup 1</i>	<i>Výstup 2</i>	<i>Výstup 3</i>	<i>Výstup 4</i>	<i>Výstup 5</i>	<i>Výstup 6</i>	<i>Výstup 7</i>	<i>Výstup 8</i>
Minimum [dB]	7,828	10,78	10,49	9,878	9,462	9,173	7,66	9,276
Dolní kvartil [dB]	12,71	12,67	11,7	11,45	12,28	12,28	11,98	10,45
Medián [dB]	13,04	13,09	12,09	11,86	12,91	12,78	12,55	11,22
Průměr [dB]	13,1	13,19	12,3	11,94	12,8	12,54	12,4	11,72
Horní kvartil [dB]	13,54	13,56	12,78	12,28	13,58	13,1	13,13	12,87
Maximum [dB]	16,36	16,45	14,77	14,73	15,08	14,79	15,19	19,22
Směrodatná odchylka	1,3195	1,1512	0,9144	0,8556	1,093	1,1074	1,1166	1,5918

Tabulka 5.11: Explorační analýza dělicích poměrů pro vlnovou délku 1310 nm (Gezhi)

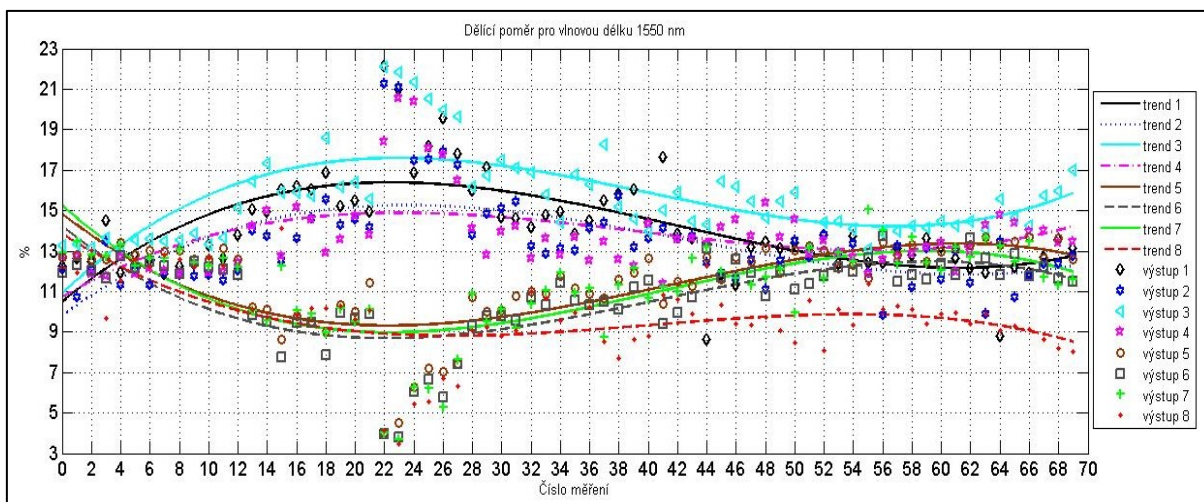


Obrázek 5.22: Krabicové grafy dělicích poměrů pro vlnovou délku 1310 nm (Gezhi)

Z explorační analýzy lze vyčíst, že u výstupu 7 byla naměřena nejnižší hodnota dělicího poměru, která dosahovala 7,66 %. Takovému dělicímu poměru odpovídá vložný útlum o velikosti 21,0351 dB. Naopak nejvyšší dělicí poměr byl zaznamenán během 15. měření u výstupu 8 měření ve velikosti 19,2161 %. Pro zajímavost, vložný útlum byl u tohoto výstupu 11,4137 dB.

Celkově se dělicí poměry u vlnové délky 1310 nm pohybovaly v rozmezí od 11,72 % do 13,19 %, což je příznivější výsledek, než u vlnové délky 1550 nm (viz dále v textu). Hodnoty blízké 12,5 % dosahovaly při vlnové délce 1310 nm čtyři výstupy. Z toho nejbližší byl výstup 7, který nabýval 12,5510 %. Naopak nejdále byl od této hodnoty vzdálen výstup 8, u kterého byl naměřen dělicí poměr ve výši 11,2176 %.

Nyní je pozornost věnována vlnové délce 1550 nm.



Obrázek 5.23: Dělicí poměry pro vlnovou délku 1550 nm (Gezhi)

U základního měření byl interval 12–13 % naměřen u šesti výstupů. To je shodné s vlnovou délkou 1310 nm. Průběh dělicího poměru byl však kolísavější, než tomu bylo u 1310 nm. Poměry mnohem častěji nabývaly vyšších hodnot než 13 %, popřípadě nižších než 12 %. Jak již bylo zmíněno, pokud dělicí poměr u určitého výstupu klesne, na jiném dojde ke zvýšení. V obrázku 5.23 je toto zjištění potvrzeno a navíc je zde zobrazena proměnlivost jednotlivých výstupů (chvíli klesají a poté stoupají). Rovnice pro výpočty polynomů a jejich koeficient spolehlivosti (R^2) lze vidět níže.

$$\text{Výstup 1: } y = 0,0001x^3 - 0,0183x^2 + 0,5999x + 10,4852 \quad R^2 = 0,4938 \quad (5.72)$$

$$\text{Výstup 2: } y = 0,0001x^3 - 0,0157x^2 + 0,5338x + 9,7891 \quad R^2 = 0,4336 \quad (5.73)$$

$$\text{Výstup 3: } y = 0,0002x^3 - 0,0208x^2 + 0,6763x + 10,9048 \quad R^2 = 0,5183 \quad (5.74)$$

$$\text{Výstup 4: } y = 0,0001x^3 - 0,0127x^2 + 0,4161x + 10,7379 \quad R^2 = 0,2502 \quad (5.75)$$

$$\text{Výstup 5: } y = -0,0001x^3 + 0,0173x^2 - 0,5635x + 14,8199 \quad R^2 = 0,5574 \quad (5.76)$$

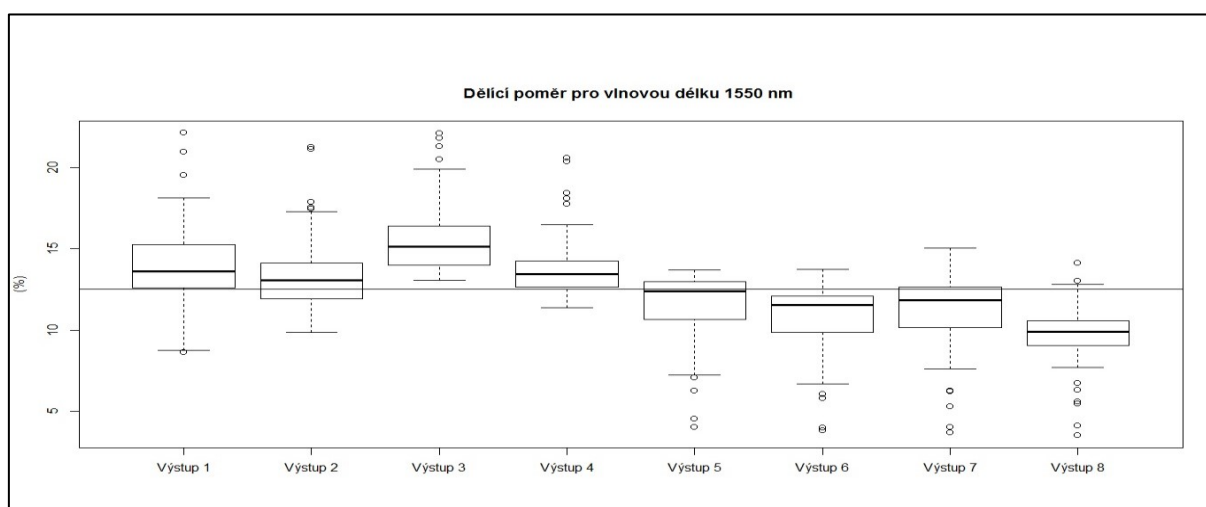
$$\text{Výstup 6: } y = -0,0001x^3 + 0,0177x^2 - 0,5701x + 14,1957 \quad R^2 = 0,5316 \quad (5.77)$$

$$\text{Výstup 7: } y = -0,0002x^3 + 0,0198x^2 - 0,6405x + 15,2327 \quad R^2 = 0,5248 \quad (5.78)$$

$$\text{Výstup 8: } y = -0,0001x^3 + 0,0127x^2 - 0,4519x + 13,8347 \quad R^2 = 0,3308 \quad (5.79)$$

	Výstup 1	Výstup 2	Výstup 3	Výstup 4	Výstup 5	Výstup 6	Výstup 7	Výstup 8
Minimum [dB]	8,611	9,851	13,06	11,39	3,998	3,783	3,681	3,49
Dolní kvartil [dB]	12,61	11,94	14,03	12,65	10,66	9,869	10,14	9,054
Medián [dB]	13,62	13,08	15,15	13,43	12,4	11,53	11,83	9,881
Průměr [dB]	14,11	13,35	15,55	13,72	11,48	10,78	11,24	9,764
Horní kvartil [dB]	15,2	14,1	16,36	14,23	12,97	12,09	12,66	10,58
Maximum [dB]	22,15	21,26	22,11	20,58	13,69	13,75	15,05	14,14
Směrodatná odchylka	2,3561	2,1529	2,124	1,824	2,1085	2,0493	2,2391	1,9539

Tabulka 5.12: Explorační analýza dělicích poměrů pro vlnovou délku 1550 nm (Gezhi)



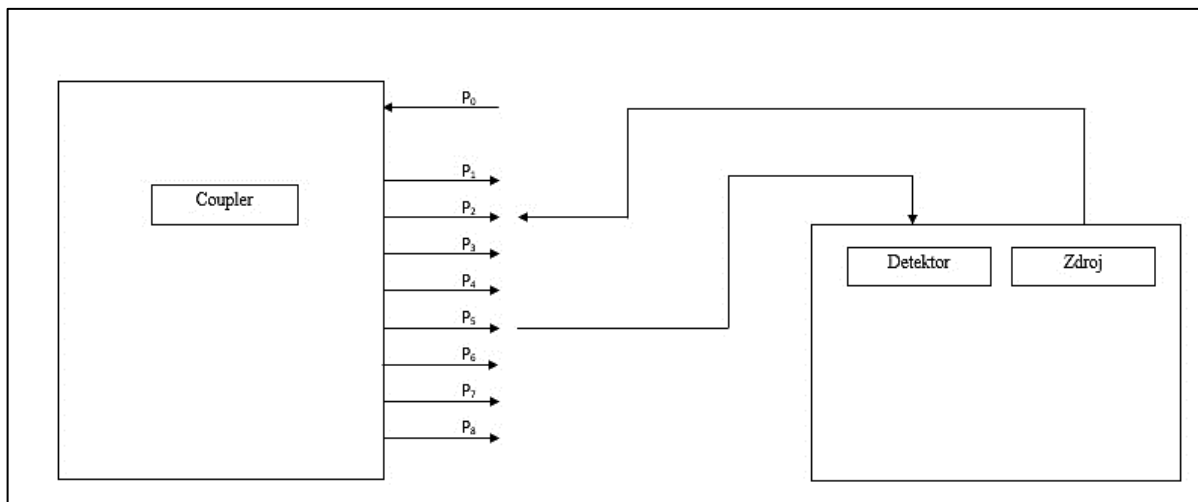
Obrázek 5.24: Krabicové grafy dělicích poměrů pro vlnovou délku 1550 nm (Gezhi)

Z obrázku 5.24 je patrné, že průměrně nejvyšší dělicí poměr byl dosažen u výstupu 3. Konkrétně se jednalo o 15,1454 %. Zároveň byl u tohoto výstupu zaznamenán i nejvyšší průměrný vložný útlum pro tuto délku, a to 16,4746 dB. Opět lze vidět vazbu mezi dělicím poměrem a vložným útlumem. Naopak nejvyšší průměrná hodnota dělicího poměru byla u osmého výstupu 9,7640 %. Tento výstup vykazoval velký vložný útlum o hodnotě 18,5680 dB. V průběhu všech měření byl zjištěn i maximální dělicí poměr, který dosahoval 22,1524 % u výstupu 1. Takovému dělicímu poměru odpovídá útlum 18,3950 dB. Naopak zaznamenán nejvyšší dělicí poměr a to 3,4898 %, s hodnotou vložného útlumu o 26,1921 dB. Nicméně celkový výsledek je u této vlnové délky překvapující, a to z důvodu, že žádný z výstupů nebyl v rozsahu od 12 do 13 %. Čtyři výstupy disponovaly hodnotami většími než 13,35 % a stejný počet výstupů naopak hodnotami pod 11,48 %. Nejblíže se k hodnotě 12,5 % přiblížil výstup 5, jehož medián byl 12,3955 %.

5.6 Směrovost

Tento parametr je také znám jako útlum přeslechu. Jeho prostřednictvím je určována velikost optického výkonu, jenž přechází mezi jednotlivými výstupy. Není žádoucí, aby optický výkon, který je určen do daného výstupu, přecházel do jiného. Útlum přeslechu tedy musí být co největší a jeho měřicí jednotkou je dB. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3, směrovost by měla dosahovat minimální hodnoty

50 dB. Standardní hodnota, kterou jednotliví výrobci couplerů garantují, je hodnota větší nebo rovna 50 dB. Nicméně na požádání může být směrovost i větší než 70 dB. Útlum přeslechu je měřen kombinací všech výstupů. Schéma měření lze vidět na obrázku 5.25. Směrovost v této práci nebude zkoumána do takové hloubky, jako tomu bylo například u vložného útlumu, a to z důvodu velkého objemu dat.



Obrázek 5.25: Schéma měření směrovosti mezi výstupy 2 a 5

Jakmile byl změřen výkon mezi jednotlivými výstupy, viz obrázek 5.25, bylo zapotřebí jednotlivé směrovosti mezi těmito větvemi dopočítat. V předpisu 5.80 je zobrazen obecný tvar rovnice pro výpočet směrovosti (Directionality), kde $P_{1,2}$ je výkon, který byl změřen mezi výstupy a P_0 je vstupní výkon [15].

$$D = -10 \times \log \frac{P_{1,2}}{P_0} \text{ [dB]} \quad (5.80),$$

Pro ukázkou užití této rovnice bylo zvoleno základní měření coupleru firmy Optokon s vlnovou délkou 1310 nm. Než dojde k dopočtu příkladu, je nejprve zapotřebí převést hodnoty do stejných jednotek. Výkon P_0 je uváděn v mikrowattech (μW) a výkony mezi výstupy 2 a 5 jsou v pikowattech (pW).

$$D = -10 \times \log \frac{128 \times 0,000001}{2680} = 73,2092 \text{ dB} \quad (5.81)$$

5.6.1 Směrovost coupleru Optokon

Měřením směrovosti u nového coupleru bylo zjištěno, že obě vlnové délky splňují podmínky uvedené v technické specifikaci. Pro vlnovou délku 1310 nm to bylo v průměru 56,7213 dB a u 1550 nm 69,0171 dB. Měřicí přístroj dokáže měřit optické výkony pouze do hodnoty 30 pW. Pokud hodnoty klesnou pod tuto hranici, není možné změřit výkon mezi výstupy. Tato situace několikrát nastala. Nejnižší útlum přeslechu byl u vlnové délky 1310 nm zaznamenán mezi výstupy 7 a 8 s hodnotou 60,7433 dB. Naopak nejvyšší byl mezi výstupy 1 a 6, a to 79,058 dB. Útlum přeslechu byl u této vlnové délky kolísavější než v případě 1550 nm. Průměrná hodnota mezi všemi výstupy za celé měření je okolo 71,81 dB.

I při měření vlnové délky 1550 nm nastaly situace, kdy nebylo možné změřit výkon mezi výstupy. Nicméně tato vlnová délka vykazovala příznivější hodnoty. U šesti kombinací výstupů směrovost neklesla pod hodnotu základního měření. Nejnižší směrovost byla naměřena mezi výstupy 3

a 4 s hodnotou 52,6526 dB. Naopak nejvyšší byl mezi výstupy 2 a 6, čemuž odpovídal útlum přeslechu 78,9028 dB. Průměrná směrovost se pro vlnovou délku 1550 nm za všechna měření pohybovala okolo 72,4476 dB.

5.6.2 Směrovost coupleru Gezhi

Průměrná směrovost nového coupleru byla velmi vysoká. Pro vlnové délky 1310 nm se jednalo o hodnotu 74,3424 dB. Poté bylo sledováno velké zhoršení. U některých výstupů byly zaznamenány pouze zhoršené výsledky, s výjimkou jednoho či dvou měření, ve kterých byly hodnoty kladné. Ve srovnání s couplerem firmy Optokon docházelo častěji k situaci, kdy nebylo možné změřit optický výkon. Nejdelší série nemožnosti měření výkonu nastala mezi výstupy 2 a 4 a trvala 14 týdnů. Nejmenší útlum přeslechu byl zaznamenán mezi výstupy 2 a 3 s hodnotou 52,6002 dB, zatímco maximální směrovost byla 79,4092 dB mezi výstupy 1 a 8. Průměrně se útlum přeslechu pohyboval ve výši 61,3257 dB.

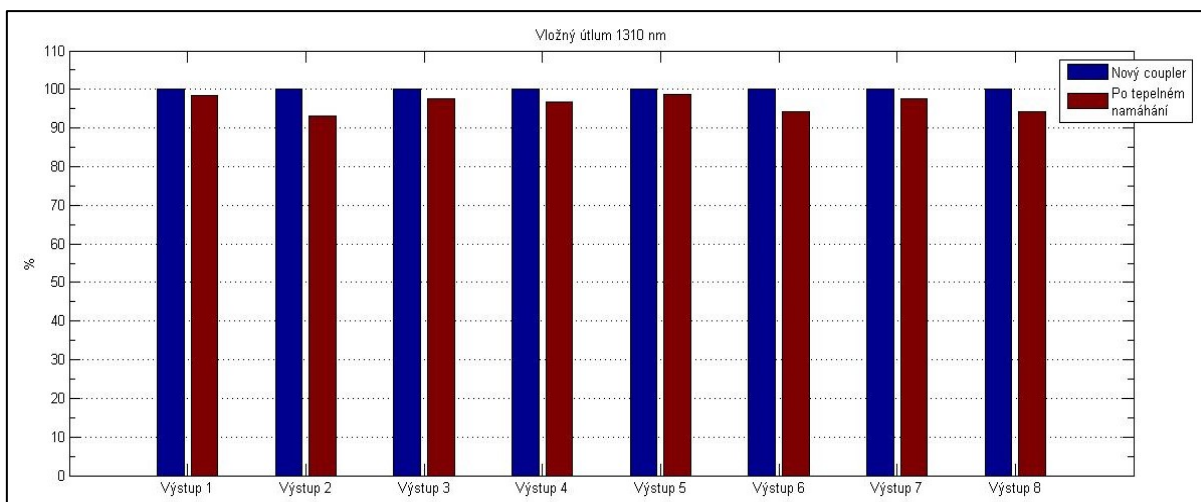
Pro vlnovou délku 1550 nm byla směrovost u nového coupleru 75,2896 dB. I v tomto případě jde o velmi dobrou hodnotu. Nicméně v průběhu měření opět nastala situace, kdy nebylo možné změřit výkony mezi výstupy. U této vlnové délky to bylo častější než u 1310 nm. Zhoršení je zde velmi patrné, jelikož ze sedmdesáti měření došlo ke zlepšení hodnot pouze několikrát. Nejnižší směrovost byla naměřena mezi výstupy 2 a 4 s hodnotou 54,5853 dB, naopak nejvyšší útlum dosahoval 79,4092 dB. Průměrná hodnota útlumu přeslechu byl u této vlnové délky 54,9285 dB.

6 Nalezení změnových charakteristik pro optické děliče vlivem tepelného stárnutí

V této kapitole lze nalézt srovnání hodnot naměřených po tepelném namáhání tepelného namáhání se základním měřením. U každého parametru je možné vidět procentuální změnu způsobenou teplem. Pro lepší přehlednost je využito grafického znázornění.

6.1 Optokon

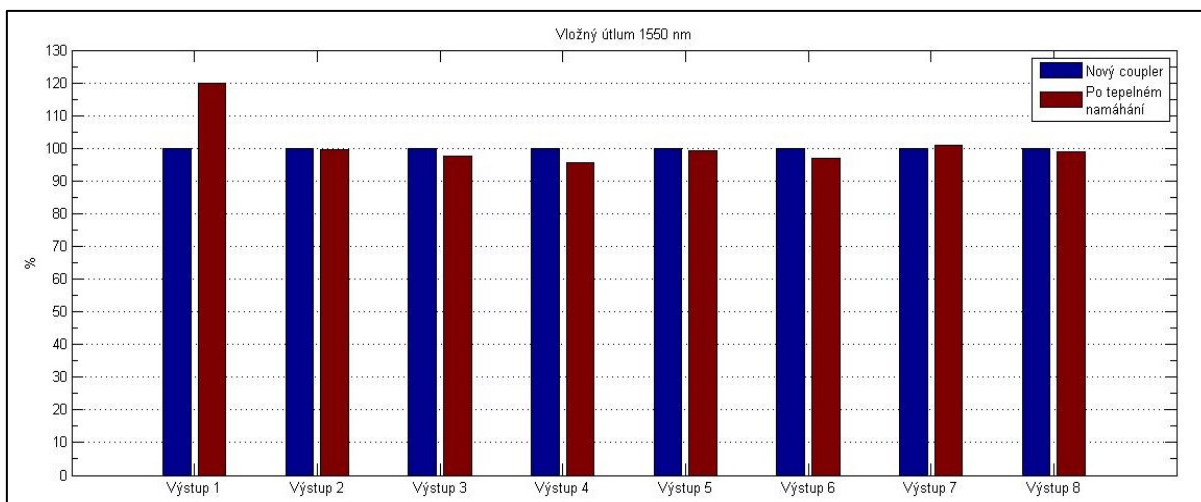
Prvním sledovaným parametrem byl vložný útlum. V následujícím sloupcovém grafu je zobrazena procentuální změna vložného útlumu pro jednotlivé výstupy u vlnové délky 1310 nm.



Obrázek 6.1: Procentuální výsledky vložného útlumu pro 1310 nm

Modrý sloupec představuje základní měření, kdy coupler nebyl tepelně namáhán. Jedná se o výchozí měření představující 100 %. Sloupec červené barvy zobrazuje průměrnou hodnotu po tepelném namáhání. Z obrázku 6.1 je patrné, že všechny výstupy vykazovaly nižší, tedy zlepšené hodnoty oproti základnímu měření. Největší změna byla zaznamenána u výstupu 2, ve kterém byl zjištěn pokles (zlepšení) o 6,8918 % na konečných 93,1082 %. Naopak nejnižší změna nastala u výstupu 5, kde došlo k procentuálnímu snížení pouze o 1,3002 %.

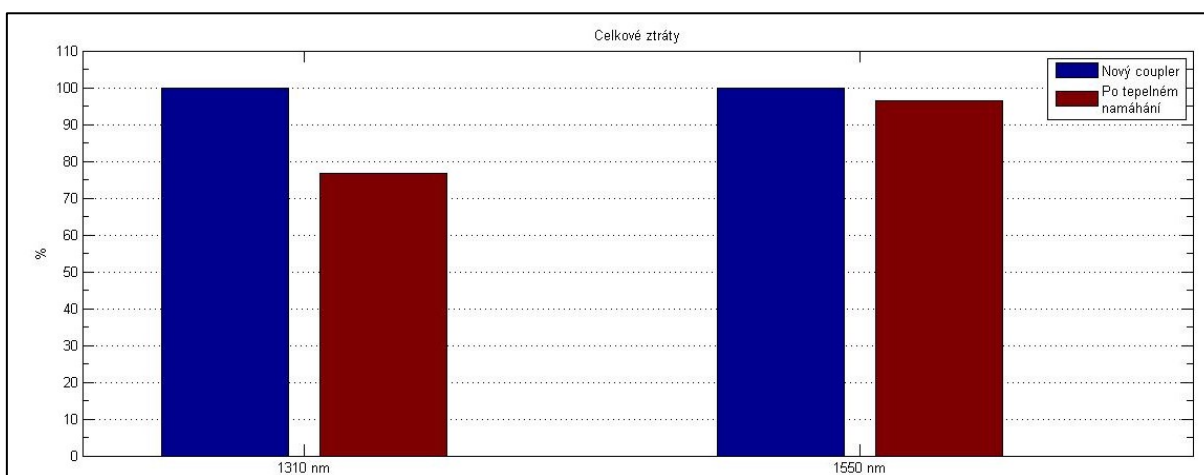
V obrázku 6.2 jsou zobrazeny procentuální změny vložného útlumu pro vlnovou délku 1550 nm.



Obrázek 6.2: Procentuální výsledky vloženého útlumu pro 1550 nm

U vlnové délky 1550 nm nebyly výsledky tak jednoznačné, jako u předchozího příkladu. Bylo zjištěno, že některé výstupy opět klesaly, jiné však rostly. Právě výstupy 1 a 7 vykazovaly zvýšené (zhoršené) hodnoty oproti novému coupleru. Zatímco výstup 1 zaznamenal nárůst o 19,7045 %, u výstupu 7 se jednalo pouze o zvýšení (zhoršení) 0,7654 %. Naopak největší zlepšení je patrné u výstupu 4, kde se průměrná hodnota vloženého útlumu po tepelném namáhání snížila o 4,3717 % na konečnou hodnotu 95,6283 %.

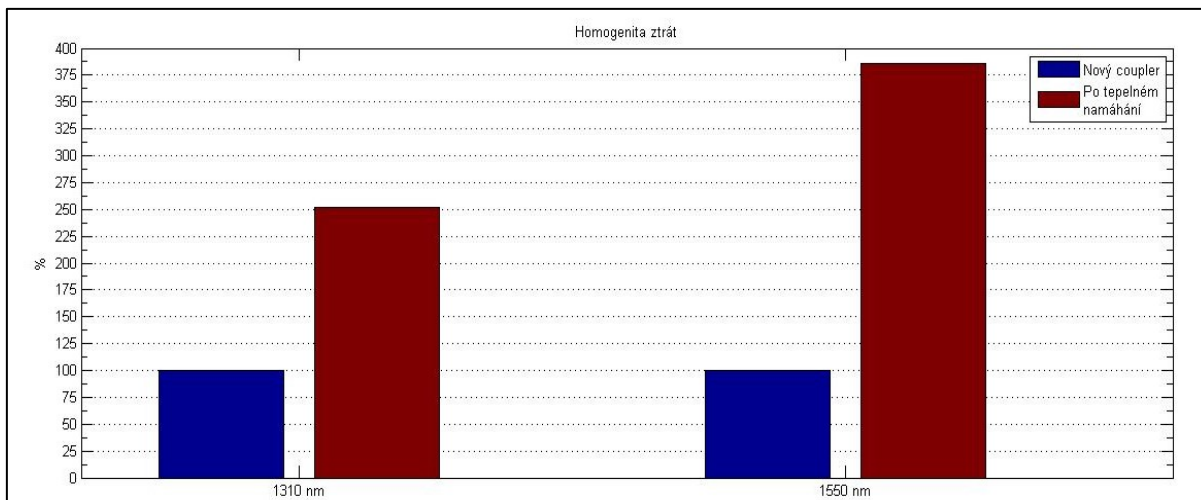
Dalším sledovaným parametrem byly celkové ztráty. Změny celkových ztrát pro obě vlnové délky je možné vidět v následujícím grafu. V levé části se nachází vlnová délka 1310 nm a v pravé části 1550 nm.



Obrázek 6.3: Procentuální výsledky celkových ztrát

U vlnové délky 1310 nm lze vidět značný procentuální propad. Celkové ztráty dosahovaly v základním měření 1,8734 dB. Během tepelného namáhání došlo k jejich průměrnému snížení (zlepšení) na 1,4353 dB. Z toho vyplývá, že průměrné snížení činilo 23,3876 %. U vlnové délky 1550 nm nebyl propad tak velký. Ačkoliv i v tomto případě byl pokles (zlepšení) zaznamenán, jednalo se pouze o snížení o 3,5594 % oproti výchozímu.

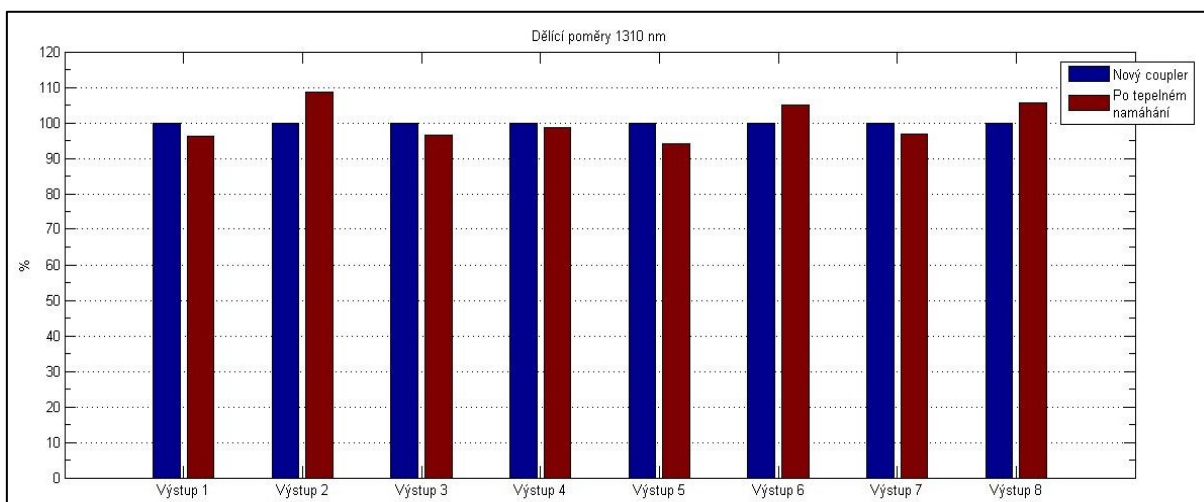
Dále je věnována pozornost homogenitě ztrát. V následujícím obrázku jsou opět zaznamenány výsledky pro obě vlnové délky.



Obrázek 6.4: Procentuální výsledky homogenity ztrát

Homogenita ztrát u obou vlnových délek vykazovala po tepelném namáhání velký rozdíl oproti základnímu měření. V základním měření byla homogenita ztrát 0,6282 dB (1310 nm) a 0,8401 dB (1550 nm). Průměr naměřených hodnot po tepelném namáhání se zvýšil na 1,5787 dB (1310 nm) a 3,2389 dB (1550 nm). Jak lze v obrázku 6.4 vidět, nárůst je několikanásobný. U vlnové délky 1310 nm se jednalo o nárůst (zhoršení) o 151,3217 %. Pro 1550 nm byl tento nárůst (zhoršení) ještě větší, a to o 285,5333 %.

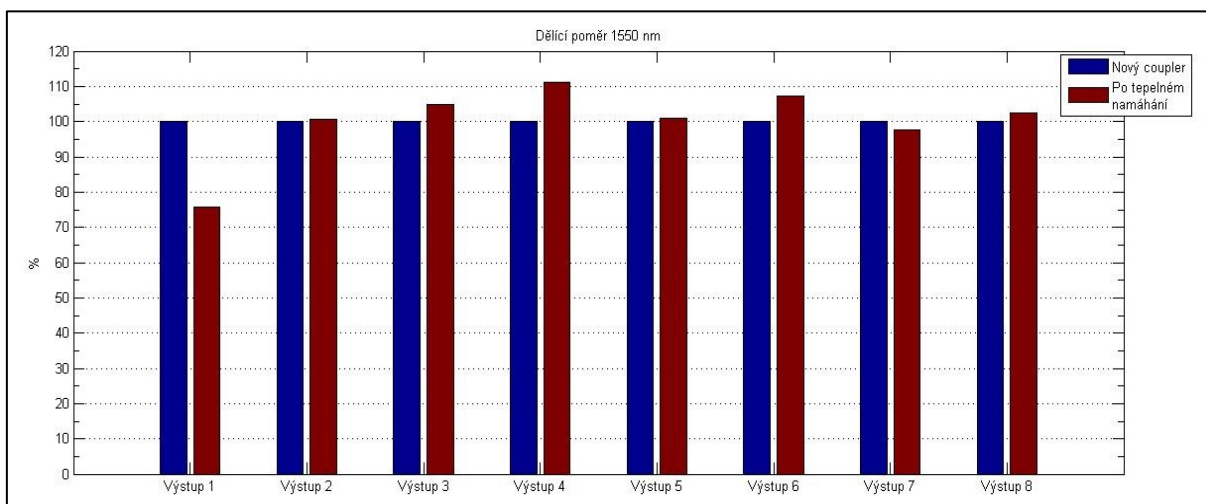
Posledním sledovaným parametrem byl dělicí poměr. Nejprve je prostor věnován vlnové délce 1310 nm a poté 1550 nm.



Obrázek 6.5: Procentuální výsledky dělicího poměru pro 1310 nm

Z obrázku je patrné, že tři výstupy po tepelném namáhání tepelného namáhání vykazovaly zvýšených hodnot oproti základnímu měření. Základním měřením bylo zjištěno, že tři výstupy byly mimo teoretické rozmezí 12–13 %. Průměr tepelného namáhání odhalil, že se tento počet výstupů snížil o jeden.

Nejvyšší nárůst nastal u výstupu 2, který se zvýšil o 8,5138 procentních bodů. Naopak nejvyššího snížení bylo zaznamenáno u výstupu 5, rozdíl byl o 5,9353 procentních bodů. Nyní jsou sledovány změny u vlnové délky 1550 nm.

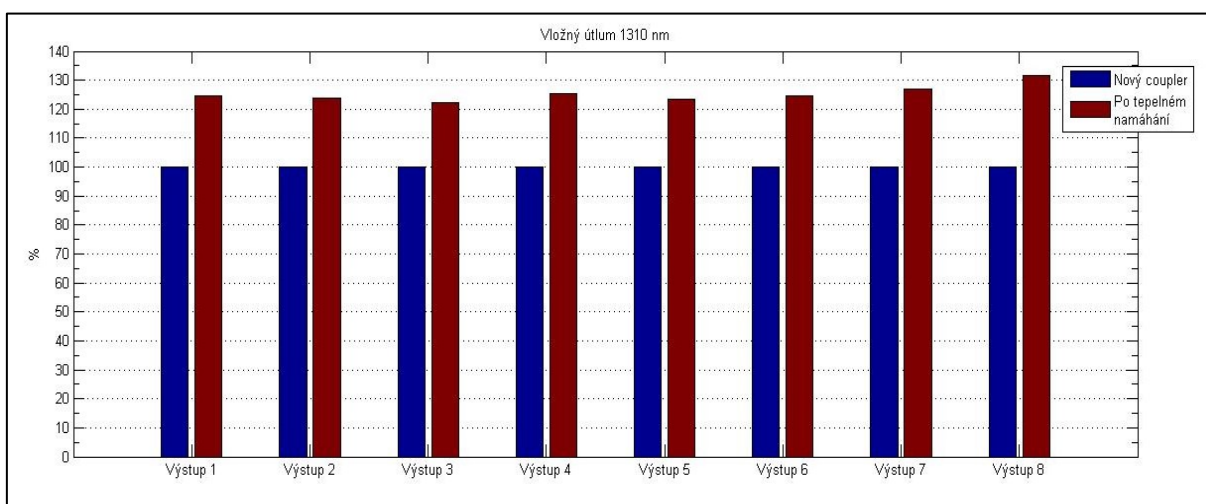


Obrázek 6.6: Procentuální výsledky dělicího poměru pro 1550 nm

U vlnové délky 1550 nm došlo také ke zhoršení hodnot. V základním měření byly čtyři výstupy v rozmezí 12 až 13 %. Naopak během tepelného namáhání se počet výstupů snížil již na dva. Dělicí poměr byl v základním měření u prvního výstupu 12,2249 % a po tepelném namáhání dosahoval poměr jen 9,2424 %. U tohoto výstupu bylo zaznamenáno nejvyššího snížení, kde výsledná hodnota byla nižší o 24,3971 procentních bodů. Naopak u výstupu 4 nastal největší nárůst z 12,1915 % na 13,5345 % po tepelném namáhání. Jednalo se tedy o zvýšení o 11,0163 procentních bodů oproti výchozímu měření.

6.2 Gezhi

I u tohoto coupleru byl prvním sledovaným parametrem vložný útlum. V obrázku 6.7 je zobrazena procentuální změna pro jednotlivé výstupy u vlnové délky 1310 nm.

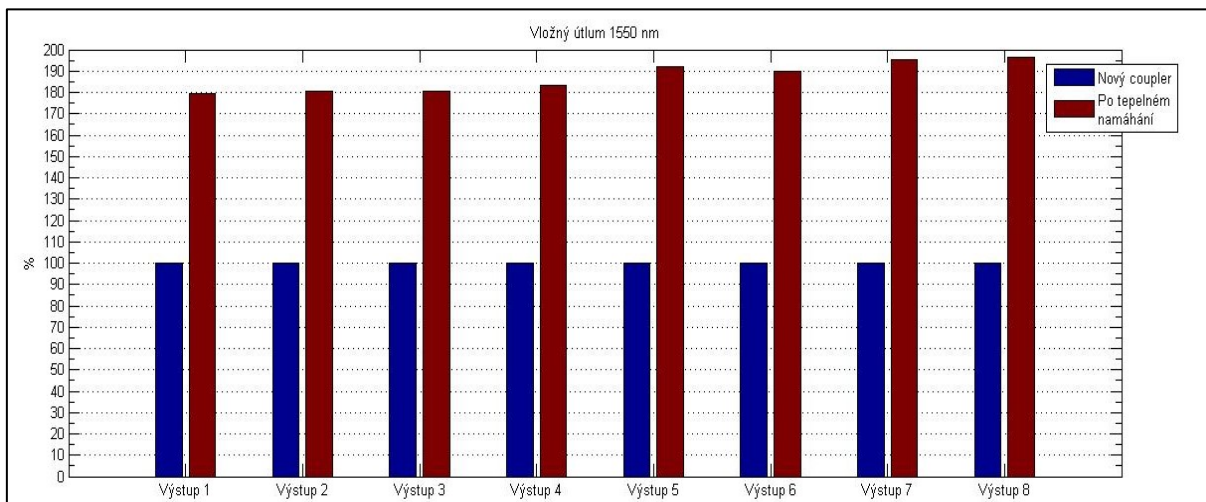


Obrázek 6.7: Procentuální výsledky vložného útlumu pro 1310 nm

U této vlnové délky došlo ke zhoršení hodnot oproti základnímu měření ve všech výstupech. Nejvyšší změna byla zaznamenána u výstupu 8, kde průměrný nárůst (zhoršení) činil 31,6126 % oproti

základnímu měření. Ačkoliv všechny výstupy vykazovaly zvýšených útlumů, nejvyšší rozdíl oproti výchozímu měření byl zjištěn u výstupu 3. Jeho hodnota byla průměrně zvýšená (zhoršená) pouze o 22,1636 %.

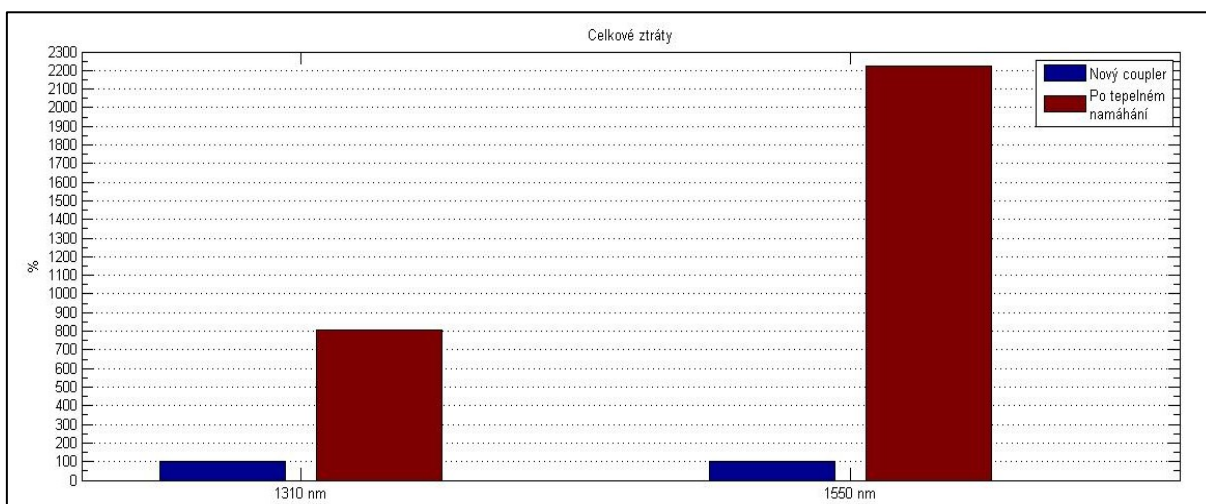
V následujícím obrázku jsou procentuální změny vložného útlumu vlivem tepelného namáhání pro vlnovou délku 1550 nm.



Obrázek 6.8: Procentuální výsledky vložného útlumu pro 1550 nm

Jak je z obrázku 6.8 patrné, u vlnové délky 1550 nm došlo k mnohonásobnému zhoršení průměrných hodnot vložných útlumů. Vložný útlum u výstupu 8 dosahoval v základním měření 9,5180 dB a po tepelném namáhání průměrně 18,6991 dB. Navýšení (zhoršení) zde bylo rovno 96,46 %. Nejvyšší průměrné zvýšení (zhoršení) oproti výchozímu měření bylo u výstupu 1, jednalo se o 79,301 %

Dalším sledovaným parametrem byly celkové ztráty. Stejně jako u Optokonu, jsou v následujícím obrázku zaznamenány obě vlnové délky.

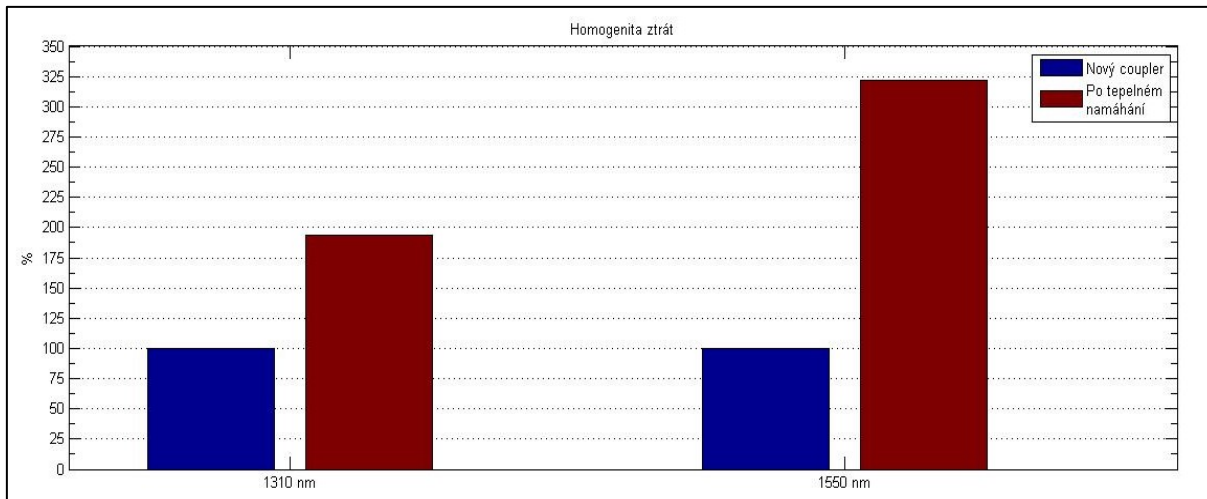


Obrázek 6.9: Procentuální výsledky celkových ztrát

U tohoto parametru došlo k nejmarkantnějším změnám, které byly v rámci této diplomové práce zaznamenány. Již z obrázku 6.9 lze vidět, že je navýšení obrovské. V základním měření pro 1310 nm nabývaly celkové ztráty 0,3304 dB a průměr po tepelném namáhání byl 2,6713 dB. Došlo tedy ke

zvýšení (zhoršení) o 708,4772 % oproti základnímu měření. Nicméně u vlnové délky 1550 nm byl nárůst ještě větší. Ve výchozím měření byly ztráty 0,3806 dB a po tepelném namáhání dosahovaly v průměru 8,4649 dB. V tomto případě došlo k nárůstu (zhoršení) o neuvěřitelných 2124 %.

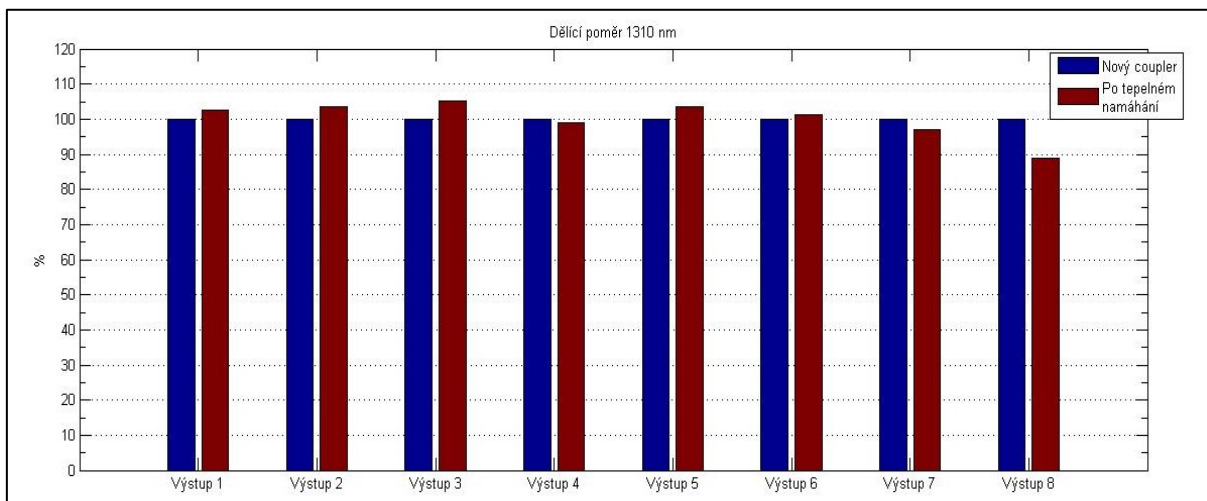
Dalším zkoumaným parametrem je homogenita ztrát.



Obrázek 6.10: Procentuální výsledky homogenity ztrát

V rámci tohoto parametru došlo také ke zhoršení hodnot oproti základnímu měření. Nicméně tento coupler vykazoval lepších hodnot, než tomu bylo u coupleru Optokon. U vlnové délky 1310 nm byla v základním měření zaznamenána homogenita ztrát 0,6988 dB a po tepelném stárnutí průměrně 1,3552 dB. Došlo k navýšení (zhoršení), a to konkrétně o 93,9261 %. Pro 1550 nm nastala větší změna. Ve výchozím měření byly ztráty 0,7598 dB a po tepelném namáhání vzrostly průměrně na 2,4465 dB. Jednalo se tedy o průměrný nárůst o 222,0044 % oproti základnímu měření.

Posledním sledovaným parametrem byl dělicí poměr. Prvně je sledován tento parametr u vlnové délky 1310 nm a poté pro 1550 nm.

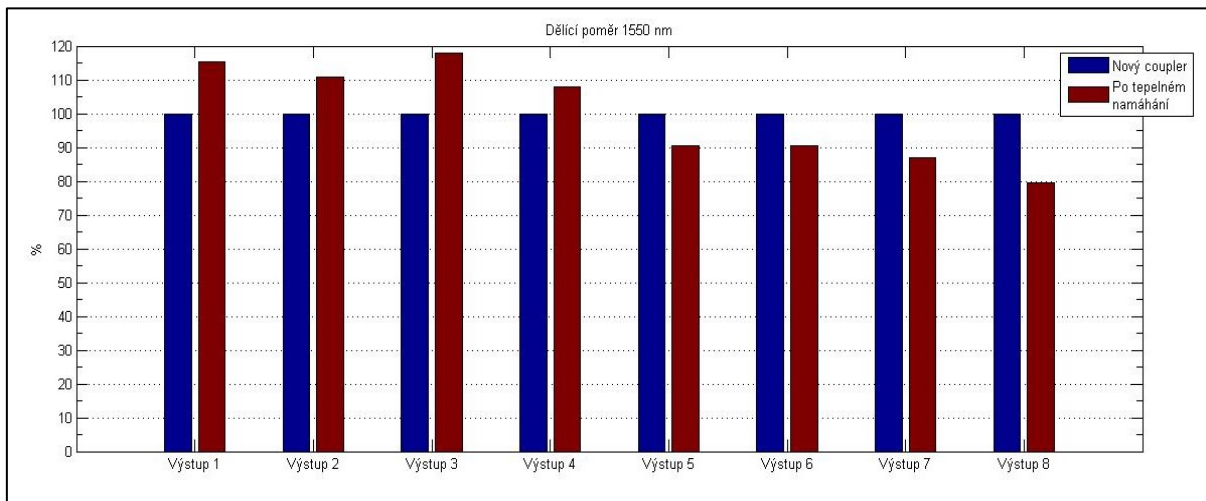


Obrázek 6.11: Procentuální výsledky dělicího poměru pro 1310 nm

V základním měření bylo šest výstupů v rozmezí 12 až 13 %. Po tepelném namáhání byly v tomto intervalu pouze čtyři. Jak lze vidět z obrázku 6.11, nejvyšší navýšení oproti výchozímu měření

bylo zaznamenáno u výstupu 3. Jednalo o průměrný nárůst o 5,1646 procentních bodů. Naopak velké snížení bylo zjištěno u výstupu 8, kde byl průměrný propad o 11,1154 procentních bodů.

V následujícím obrázku jsou zaznamenány změny dělicích poměrů pro vlnovou délku 1550 nm.



Obrázek 6.12: Procentuální výsledky dělicího poměru pro 1550 nm

Ačkoliv v rámci základního měření bylo šest výstupů v rozmezí 12 až 13 %, tak po tepelném namáhání v tomto intervalu nebyl žádný výstup. Průměrné změny byly u této vlnové délky poměrně velké. Nejvyšší nárůst oproti základnímu měření byl u výstupu 3, kde došlo k průměrnému zvýšení o 17,8208 procentních bodů. Naopak nejvyšší snížení oproti výchozímu měření bylo u výstupu 8. Dělicí poměr u tohoto výstupu klesl z 12,2113 % na konečný průměr 9,7286 %. Nastalo tedy snížení o 20,3317 procentních bodů oproti základnímu měření.

7 Zhodnocení měření

Z předchozích kapitol jsou známy veškeré parametry, které byly postupem času měřeny. Obsahem této kapitoly je zhodnocení vlivu tepelného namáhání na tyto parametry u obou používaných couplerů. První část kapitoly je věnována coupleru firmy Optokon a ve druhé části jsou popsány výsledky coupleru firmy Gezhi.

7.1 Optokon

Prvním měřeným parametrem byl vložný útlum. Nový coupler u vlnové délky 1310 nm dosahoval relativně vysokých hodnot vložného útlumu. Dle technické specifikace by maximální vložné ztráty měly být menší nebo rovny 10,7 dB. Během základního měření však jejich hodnota dosahovala v průměru za všechny větve velikosti okolo 10,9 dB. To je negativní výsledek. V souladu s očekáváním došlo k nárůstu hodnot již v prvním týdnu tepelného namáhání. V dalších týdnech se hodnoty pohybovaly střídavým vývojem. Od 52. měření se průměrné vložné ztráty pohybovaly pod hranicí 10 dB. Překvapivě nejnižší průměrná hodnota byla zaznamenána až v době tepelného namáhání s hodnotou 9,4940 dB. U posledního měření byly vložné ztráty rovny 9,8527 dB. V rámci změnových charakteristik došlo u všech výstupů ke snížení vložných útlumů. Nejvyšší průměrný pokles (zlepšení) byl zaznamenán u výstupu 2, a to o 6,8918 % v porovnání se základním měřením. Z výsledků lze usoudit, že tepelné namáhání má pozitivní vliv na vložný útlum u vlnové délky 1310 nm.

U vlnové délky 1550 nm byly zaznamenány podobné závěry jako u předchozí vlnové délky. V základním měření dosahovaly ztráty nižšího čísla, než tomu bylo u 1310 nm a průměrná hodnota za všechny větve byla okolo 10,4073 dB. Poté nastalo období, kdy se vložné útlumy začaly vyvíjet kolísavě. U výstupu 1 bylo zaznamenáno od 33. měření kontinuální zhoršení oproti základnímu měření. I u této vlnové délky byla nejnižší průměrná hodnota velmi nízká, a to 9,2303 dB. V posledním měření byly průměrné ztráty 10,0560 dB. Průměrná hodnota vložných ztrát byla po tepelném namáhání tepelného namáhání 10,5156 dB. Změnová charakteristika ukázala negativní vývoj u výstupu 1, kde došlo ke zvýšení (zhoršení) vložného útlumu oproti základnímu měření průměrně o 19,7045 %. Naopak nejlepšího zlepšení (snížení) bylo zaznamenáno u výstupu 4, a to o 4,3717 % oproti výchozímu měření. I v tomto případě byl vložný útlum mírně pod hodnotou, kterou výrobce garantuje. Tepelné namáhání opět pozitivně ovlivňuje tento parametr.

Z definice celkových ztrát je známo, že přijatelná hodnota tohoto parametru je okolo 1 dB. Hodnoty 0 dB není možné v praxi dosáhnout. Již v základním měření bylo zjištěno, že se celkové ztráty pohybuji poměrně vysoko. V prvním měření došlo k nárůstu tohoto parametru u obou vlnových délek. Poté se vývoj změnil a naměřené hodnoty byly nižší než v prvním měření. Následně byl zaznamenán střídavý trend vývoje. U vlnové délky 1310 nm byly od 46. měření zaznamenány zlepšené výsledky, jejichž pozitivní vývoj pokračoval až do posledního měření. U 1550 nm souvislý vývoj zlepšení nebyl sledován. Minimální celkové ztráty byly opět zjištěny až v průběhu tepelného namáhání. U vlnové délky 1310 nm se jednalo o 0,4452 dB a pro 1550 nm to bylo 0,1968 dB, což lze považovat za velmi dobré hodnoty. Ačkoliv maximální celkové ztráty byly pro 1310 nm 4,6070 dB a u 1550 nm 4,3004 dB, tak celkový průměr za všechna měření nabýval 1,4415 dB pro 1310 nm a 1,3202 dB u vlnové délky 1550 nm. Změnová charakteristika pro obě vlnové délky ukázala pozitivní vývoj. Pro 1310 nm došlo ke

snížení oproti základnímu měření o 23,3874 %. Menšího zlepšení bylo zaznamenáno i u 1550 nm, kde nastal pokles o 3,5594 %. Lze tedy říct, že tepelné namáhání má na tento parametr pozitivní vliv.

Prostřednictvím homogenity ztrát je sledován rozdíl mezi maximálním a minimálním vložným útlumem. U tohoto parametru by se mělo jednat o velmi nízké číslo. Nicméně pro obě vlnové délky byly častěji vykazovány zvýšené hodnoty oproti základnímu měření. U vlnové délky 1310 nm byla minimální hodnota homogenity ztrát 0,4195 dB a pro 1550 nm 0,4123 dB. Nicméně tepelným namáháním vzrostly rozdíly mezi maximálním a minimálním naměřeným vložným útlumem. Tento fakt potvrzuje i změnová charakteristika, prostřednictvím které byl zjištěn procentuální nárůst u obou vlnových délek. Pro 1310 nm došlo k průměrnému zvýšení (zhoršení) o 151,3217 %, a u 1550 nm byl nárůst (zhoršení) větší, a to o 285,5333 %. Tento parametr byl negativně ovlivněn tepelným namáháním.

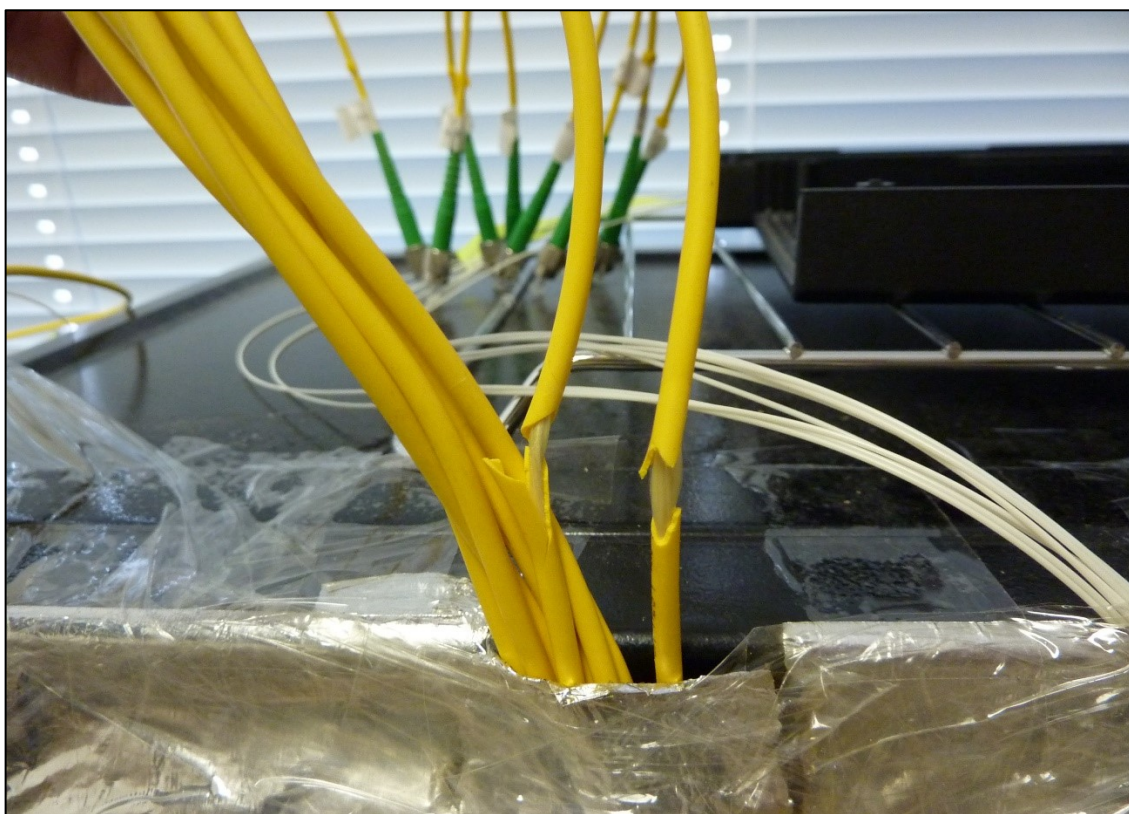
Dalším parametrem byl dělicí poměr, který vyjadřuje poměr, v jakém jsou vůči sobě výkony signálů na výstupu rozbočovače. Coupler firmy Optokon měl dělicí poměr v symetrickém režimu. Každá větev by tedy teoreticky měla mít poměr 12,5 % a jejich součet musí být roven 100 %. Je pravidlem, že pokud dělicí poměr pro danou větev nabývá vysokého čísla, protéká jím větší výkon a snižuje se vložný útlum. Pokud dělicí poměr disponuje malou hodnotou, neprotéká jím optický výkon a zvyšuje se vložný útlum. U vlnové délky 1310 nm se výstupy k hodnotě 12,5 % několikrát přiblížily. Nicméně převažovaly hodnoty, jež byly mimo rozmezí 12–13 %. Jejich součet se však vždy rovnal 100 %. Ačkoliv se během základního měření pět výstupů pohybovalo ve výše zmíněném rozmezí, v průběhu tepelného namáhání dělicí poměry hodně kolísaly. Po tepelném namáhání bylo v rozmezí 12 až 13 % šest výstupů. Změnová charakteristika následně prokázala, že největší průměrný nárůst zaznamenal druhý výstup, jednalo se o 8,5138 procentních bodů. Lze tedy říct, že došlo k pozitivnímu ovlivnění tohoto parametru.

Pro vlnovou délku 1550 nm byl průběh dělicích poměrů podobný, ačkoliv se zde mnohem častěji vyskytovaly hodnoty mimo interval 12–13 %. Minimální hodnota dělicího poměru byla 0,2996 %. Z takto nízké hodnoty je možné předpokládat, že touto větví neprotékal téměř žádný výkon. Tomu odpovídal vysoký vložný útlum o hodnotě 27,2626 dB. Naopak nejvyšší poměr byl zaznamenán u sedmého výstupu, 18,6492 %. Takovému dělicímu poměru odpovídá vložný útlum s hodnotou 9,2950 dB. Po tepelném namáhání se pouze dva výstupy pohybovaly v rozmezí 12–13 %. Teplo tedy negativně ovlivnilo tento parametr. To potvrzuje i změnová charakteristika, v rámci které bylo zjištěno, že největší průměrná změna oproti základnímu měření nastala u prvního výstupu. V tomto případě došlo k snížení o 24,3971 procentních bodů.

Posledním sledovaným parametrem byla směrovost. Český výrobce garantuje standardní směrovost, která je vyšší než 50 dB. Nicméně pokud spotřebitel vyžaduje, aby byla tato hodnota vyšší, lze vyrobit i coupler, který bude mít směrovost vyšší než 70 dB. U vlnové délky 1310 nm nastala během měření situace, kdy nebylo možné změřit výkon. Nicméně se jednalo pouze o sedm měření z celkového počtu sedmdesáti. Jelikož se tento případ udál hned v základním měření, nebylo možné přesně určit směrovost u nového coupleru. Průměrně nejnížší směrovost byla zaznamenána mezi kombinací výstupu 7 a 8, kde byla hodnota 63,1719 dB. Naopak nejvyšší útlum přeslechu byl mezi výstupy 4 a 6 s hodnotou 73,6259 dB. Průměrná hodnota za všechna měření (i s případy, kdy nebylo možné změřit výkon) byla okolo 71 dB. Teplo u některých kombinací výstupů negativně ovlivňovalo tento parametr, nicméně u jiných docházelo naopak k pozitivnímu ovlivnění. Nedá se tedy jednoznačně určit dopad tepelného namáhání na tento parametr.

Pro vlnovou délku 1550 nm byl průběh směrovosti nepatrně jiný. Situace, kdy nebylo možné změřit výkon, nastala pouze v pěti měřeních. U této vlnové délky byl útlum přeslechu v základním měření průměrně za všechny kombinace okolo 69 dB. V šesti případech byla hodnota přeslechu nižší než hodnoty v základním měření (včetně případů, kdy nebylo možné změřit výkon). V ostatních měřeních bylo dosaženo vyššího útlumu přeslechu. Nejvyšší útlum přeslechu byl zaznamenán mezi kombinací výstupu 4 a 6, stejně jako tomu bylo u vlnové délky 1310 nm, ve výši 74,4673 dB. Nejnižší směrovost byla zjištěna mezi výstupy 7 a 8 s hodnotou 67,2700 dB. Ve většině případů (i se situacemi, kdy nebylo možné změřit výkon) byla překonána hranice 70 dB u obou vlnových délek. Teplo v tomto případě mohlo zapříčinit zlepšení směrovosti. Hodnoty nad 70 dB lze považovat za velmi příznivý výsledek. I u této vlnové délky teplo v rámci některých kombinací jak negativně, tak pozitivně ovlivňovalo tento parametr. Opět nelze určit přesný dopad tepelného namáhání na tento parametr.

U coupleru od firmy Optokon došlo okolo 60. měření k mechanickému poškození v podobě prasklé ochrany vlákna u dvou výstupů (viz obrázek 7.1). Toto místo je charakteristické střídáním velkého tepla proudícího z elektrické sušící trouby s nižší pokojovou teplotou. Tato porucha však neovlivnila výsledky jednotlivých parametrů.



Obrázek 7.1: Mechanické poškození vláken

Na obrázku lze krom mechanického poškození vidět i bílé vlákna, které jsou součástí coupleru Gezhi.

7.2 Gezhi

I u tohoto coupleru byl prvním zjišťovaným parametrem vložný útlum. U vlnové délky 1310 nm byly počáteční hodnoty dle očekávání nízké. Oproti coupleru Optokon byl vložný útlum v průměru

o 1 dB nižší. Po začátku tepelného namáhání se hodnoty zvýšily a poté několik týdnů kolísaly. Od 19. měření bylo již u všech výstupů dosaženo vyšších hodnot než v základním měření. Maximální hodnota vložného útlumu, která je garantovaná výrobcem, činí 10,3 dB. Toto číslo bylo mnohokrát překročeno, u některých výstupů až dvojnásobně. Dle očekávání byl nejvyšší vložný útlum zjištěn až v průběhu tepelného namáhání na úrovni 21,0351 dB. Průměrně se jednotlivé výstupy pohybovaly v rozpětí od 11,45 dB do 11,98 dB. Celkový průměr pro tuto vlnovou délku byl roven 11,6974 dB. Garantovaná hodnota tedy byla překročena a lze usoudit, že teplo negativně ovlivňuje tento parametr. To potvrdila i změnová charakteristika, která poukázala na fakt, že všechny výstupy byly oproti základnímu měření navýšeny. Nejvyšší změna byla zaznamenána u osmého výstupu, kde průměrné zvýšení (zhoršení) činilo 31,6126 %.

Pro vlnovou délku 1550 nm byly vložné útlumy v porovnání s předchozí vlnovou délkou mírně horší. Při základním měření byly opět naměřeny velmi nízké hodnoty. Jejich průměrná hodnota činila 9,4183 dB. Po začátku tepelného namáhání došlo i u této vlnové délky ke zvýšení útlumů. Během několika dalších týdnů lze vývoj tohoto parametru charakterizovat střídavým trendem. Výjimkou je výstup 4, který dosáhl zlepšených hodnot pouze jedenkrát, a to ve 2. měření. Nicméně od 12. měření byly zhoršené hodnoty zaznamenány již u všech výstupů. Nejvyšší vložný útlum pro tuto vlnovou délku byl 33,8691 dB a nejnižší útlum byl 8,8971 dB. Průměry jednotlivých výstupů vykazovaly vysoké hodnoty v rozmezí od 16 do 19 dB. I z celkového hlediska byl průměr pro tuto vlnovou délku poměrně vysoký, jednalo se o 17,5105 dB, což je o 7,2105 dB vyšší než je garantovaná maximální hodnota vložného útlumu. I v tomto případě, byla největší změna zaznamenána u osmého výstupu. Oproti základnímu měření došlo k navýšení (zhoršení) o 96,46 %. Opět byl prokázán negativní vliv tepla na tento parametr. V porovnání s vlnovou délkou 1310 nm je důsledek tepelného stárnutí vyšší.

Druhým měřeným parametrem byly celkové ztráty. U nového coupleru byly naměřené hodnoty velmi nízké, a to 0,3304 dB pro vlnovou délku 1310 nm a 0,3806 dB pro 1550 nm. V porovnání s couplerem firmy Optokon se jedná o mnohonásobně nižší hodnoty. Po zahájení tepelného namáhání se celkové ztráty zvýšily a následně kolísaly. Netrvalo však dlouho a ztráty začaly vykazovat pouze zvýšená čísla. Nejnižších ztrát bylo dosaženo v průběhu namáhání, a to 0,0736 dB. Od osmého do posledního měření dosahovaly celkové ztráty pro vlnovou délku 1550 nm pouze vyšších hodnot. U vlnové délky 1310 nm byly nejnižší ztráty zaznamenány také až během tepelného namáhání s hodnotou 0,0251 dB. Zvýšené hodnoty u všech naměřených hodnot byly zaznamenány od 12. měření. Celkové ztráty u vlnové délky 1310 nm byly v průměru 2,6379 dB a pro 1550 nm 8,3495 dB. Změnová charakteristika poukázala na velké zvýšení (zhoršení) průměrných hodnot celkových ztrát během tepelného namáhání. Jednalo o nárůst o 708,4772 % u 1310 nm a o 2124 % u 1550 nm. Jelikož se praxi celkové ztráty pohybují okolo 1 dB, lze říct, že teplo tento parametr negativně ovlivňuje.

I pro coupler Gezhi byla třetím měřeným parametrem homogenita ztrát. V případě nového coupleru byly naměřené hodnoty těchto ztrát velmi nízké, a to z důvodu nízkých rozdílů mezi maximálním a minimálním vložným útlumem. U obou vlnových délek se jednalo o hodnoty nižší než 1 dB, což je příznivé. S rostoucím vložným útlumem však dochází ke zvyšování rozdílů mezi maximální a minimální hodnotou, což se odráží na tomto parametru. Za všechna měření došlo u 1310 nm pouze ke dvěma případům, kdy se hodnoty tohoto ukazatele zlepšily. V rámci vlnové délky 1550 nm se jednalo o čtyři výskyty. Průměrná homogenita ztrát byla u vlnové délky 1310 nm 1,3458 dB a pro 1550 nm 2,4224 dB. Změnová charakteristika potvrdila zvýšené (zhoršené) hodnoty homogenity ztrát. Ačkoliv byly průměrně zvýšené o 93,9261 % (1310 nm) a o 222,0044 % (1550 nm), tak vykazovaly lepší

hodnoty, než tomu bylo u Optokonu. Nicméně i tento parametr byl tepelným stárnutím negativně ovlivněn.

Dalším sledovaným parametrem byl dělicí poměr. Jak již bylo zmíněno, teoreticky by každý výstup měl dosahovat 12,5 %. První sledovaná vlnová délka byla 1310 nm. V základním měření se šest výstupů pohybovalo mezi 12 až 13 %. Během tepelného namáhání dělicí poměry velmi často dosahovaly hodnot mimo tento interval. Nejnižší dělicí poměr byl během tepelného namáhání zaznamenán u sedmého výstupu, a to 7,66 %. Tomu odpovídá vložný útlum s hodnotou 21,0351 dB. Naopak nejvyšší poměr byl zjištěn u osmého výstupu, 19,2161 %. Z celkového hlediska pouze čtyři výstupy (oproti šesti) vykazovaly hodnoty v tomto rozsahu po tepelném namáhání. Z tohoto hlediska lze předpokládat, že teplo negativně ovlivnilo tento parametr. Nejvyšší navýšení nastalo u výstupu 3 o 5,1645 procentních bodů.

U vlnové délky 1550 nm bylo mnohem častěji dosahováno hodnot mimo interval 12–13 %. Z počátku byly dělicí poměry nového coupleru považovány za přijatelné, jelikož pouze dva výstupy se vyskytovaly mimo daný interval. Jednalo se o výstup 3 s hodnotou 13,2224 % a výstup 6 s 11,9080 %. Několik následujících týdnů poměry kolísaly a od 13. do 43. měření byly hodnoty převážně mimo rozsah 12–13 %. Tento vývoj měl za následek, že ani jeden výstup nebyl průměrně v rozmezí 12–13 %. Nejblíže se k hranici 12,5 % přiblížil třetí výstup, který nabýval průměrné hodnoty 13,3542 %. V porovnání s teoretickou hodnotou vykazoval o 0,8542 % vyšší hodnotu. Ačkoliv tepelné stárnutí negativně ovlivňovalo vlnovou délku 1310 nm, znatelně negativnější dopad nastal u 1550 nm. Změnovou charakteristikou bylo zjištěno, že největší průměrný nárůst oproti základnímu měření vykazoval třetí výstup. Jednalo se o 17,8208 procentních bodů.

Posledním sledovaným parametrem byla směrovost. Nový coupler měl pro vlnovou délku 1310 nm vysokou hodnotu útlumu přeslechu. Minimální garantována směrovost byla 55 dB a tento coupler dosahoval v základním měření 74 dB. To lze považovat za velmi dobrou hodnotu. V průběhu tepelného namáhání velmi často docházelo k situaci, kdy nebylo možné změřit optický výkon mezi větvemi. Jak již bylo zmíněno, používaný měřicí přístroj dokáže změřit výkon od hodnoty 30pW. Tomu odpovídá útlum přeslechu okolo 79 dB. Pokud optický výkon klesl pod tuto hranici, nebylo možné zjistit přesný útlum, který by mohl být z celkového hlediska vyšší. I u vlnové délky 1550 nm byly počáteční hodnoty značně vysoké. Průměr směrovosti za všechny větve během základního měření činil 75,2896 dB. Opět se jedná o velmi dobrou hodnotu, jelikož převyšuje výrobcem garantované minimum. Z celkového hlediska docházelo u této vlnové délky k častějšímu výskytu neměřitelných výkonů i zhoršeným hodnotám oproti základnímu měření. Tepelné namáhání má nepříznivý vliv na tento parametr. Nicméně horší hodnoty byly zaznamenány u 1550 nm.

8 Závěr

Cílem diplomové práce bylo určit vliv tepelného namáhání na útlumové parametry coupleru, včetně uvedení teoretického rozboru tohoto zařízení.

Celá práce byla rozdělena do dvou hlavních částí. Jednalo se o část teoretickou, ve které byly vypracovány první tři body zadání, a praktickou, kde bylo uvedeno samotné měření, nalezení změnových charakteristik a vyhodnocení jednotlivých parametrů coupleru po tepelném stárnutí.

Obsahem druhé kapitoly byl teoretický rozbor optických sítí. Byly zde popsány aktivní a pasivní optické sítě, jejich vzájemné rozdíly, vybrané topologie sítí i běžně využívané optické přípojky. Další část byla zaměřena na standardy PON sítí, v rámci kterých byly uvedeny rozdíly mezi standardy APON, BPON, GPON, EPON, 10G-EPON, XG-PON a WDM-PON. Konec kapitoly byl věnován optickým vláknům, rozdílům mezi jednovidovými a mnohavidovými vlákny a faktorům, které způsobují jejich útlumy.

Třetí kapitola byla zaměřena na základní informace související s couplerem. Prostor byl věnován jednotlivým parametrům, mezi které patří vložný útlum, dělicí poměr, celkové ztráty, homogenita ztrát a směrovost.

Ve čtvrté kapitole bylo charakterizováno teplo i jednotlivé krystalické mřížky. Po uvedení jednotlivých druhů přenosů tepla, a to vedením, prouděním a zářením je popsáno samotné tepelné stárnutí a způsob měření couplerů. Závěr kapitoly byl věnován ilustrativní ukázce měření a technickým specifikacím měřených couplerů.

Pátá kapitola je zaměřena na výsledky měření optického děliče během tepelného stárnutí. V podkapitolách obou couplerů je možné nalézt graf trendů pro jednotlivé výstupy, popis, rovnice pro výpočty polynomů, explorační analýzu a krabicové grafy.

Obsahem šesté kapitoly bylo nalezení změnových charakteristik optického děliče po tepelném namáhání. První část je věnována coupleru Optokon a druhá coupleru Gezhi. Procentuální výsledky jednotlivých parametrů byly graficky znázorněny.

V poslední kapitole bylo obsaženo zhodnocení jednotlivých parametrů, které byly v rámci této diplomové práce měřeny. Celkovým vyhodnocením všech naměřených výsledků bylo zjištěno, že teplo negativně ovlivňuje všechny parametry coupleru Gezhi. U coupleru Optokon byl zjištěn negativní vliv na dělicí poměr a homogenitu ztrát. Pozitivní vliv byl zaznamenán u vložného útlumu, celkových ztrát a směrovosti.

Celkovým vyhodnocením všech naměřených výsledků bylo zjištěno, že teplo v některých případech negativně ovlivňuje couplery. Prvním měřeným parametrem byl vložný útlum, který by měl u couplerů s osmi výstupy dosahovat maximální hodnoty 10,8 dB. U Optokonu bylo toto číslo překročeno již v základním měření. Tento coupler vykazoval v průběhu tepelného namáhání pro 1310 nm velké množství zlepšených hodnot oproti základnímu měření. Průměrná hodnota tohoto parametru činila 10,5 dB. U vlnové délky 1550 nm byly v základním měření zaznamenány průměrné vložné ztráty okolo 10,4 dB. I v tomto případě často docházelo ke zlepšeným hodnotám oproti základnímu měření. Pouze první výstup průměrně vykazoval vyšší ztráty. Průměrná hodnota za všechna

měření se pohybovala okolo 10,5 dB. Lze tedy říct, že ačkoliv byl coupler tepelně namáhán, tak jeho hodnoty nepřesáhly garantované vložné ztráty uvedené v technické specifikaci.

Celkové ztráty dosahovaly vlivem tepelného stárnutí zlepšených hodnot. V základním měření pro 1310 nm jejich velikost činila 1,8734 dB. Po tepelném namáhání byl průměr 1,4353 dB, což značí mírné zlepšení o 0,4381 dB. Ke stejnému průběhu docházelo i u 1550 nm. V tomto případě byl však výsledný rozdíl pouze 0,0487 dB. V praxi by se měly hodnoty tohoto parametru pohybovat okolo 1 dB, čehož bylo i přes tepelné namáhání dosaženo. Z výsledků po tepelném stárnutí lze vyvodit mírné zlepšení.

U homogenity ztrát se po tepelném stárnutí vyskytovalo větší množství zhoršených hodnot. V základním měření byl tento parametr roven 0,6282 dB pro 1310 nm a 0,8401 dB pro 1550 nm a během namáhání průměrně vzrostl na hodnotu 1,5787 dB (1310 nm) a 3,2389 dB (1550 nm). Z toho je patrný nárůst (zhoršení) ztrát a lze tedy předpokládat, že příčinou je teplo.

U dělicího poměru nelze s přesností určit vliv tepelného namáhání. Celková hodnota tohoto parametru musí být 100 %, a proto by každá větev měla nabývat 12,5 %. Nicméně pokud u jednoho výstupu dojde ke snížení poměru, musí v jiném nastat růst, aby došlo k vyrovnání. V základním měření se tři výstupy vyskytovaly mimo interval 12–13 %, který lze považovat za relativně přijatelný výsledek. Po tepelném namáhání se počet výstupů mimo daný interval snížil již na dva. Je možné říci, že tepelné namáhání průměrně lépe rozvrhlo optický výkon mezi jednotlivé větve. Naopak u 1550 nm nebyl stejný výsledek zaznamenán. Během základního měření se vyskytovaly čtyři výstupy v rozmezí 12 až 13 % a po tepelném namáhání se jejich počet snížil na dva výstupy. Z toho lze usoudit negativní dopad tepla na tento parametr pro 1550 nm.

Posledním měřeným parametrem u coupleru Optokon byla směrovost. Výrobce garantuje hodnotu směrovosti vyšší než 50 dB, která byla v základním ale i v průběhu tepelného stárnutí překročena. Z výsledku lze usoudit častější výskyt zlepšených hodnot oproti výchozímu měření. Teplo v rámci některých kombinací pozitivně ale i negativně ovlivňovalo tento parametr. Nelze tedy naprosto přesně určit dopad tepelného namáhání na tento parametr.

U coupleru Gezhi byl negativní vliv tepla zaznamenán častěji než u Optokonu. Již u prvního sledovaného parametru, tedy vložného útlumu u 1310 nm se teplo projevilo výskytem velkého množství zhoršených hodnot. Konkrétně od 19. měření se už všechny výstupy pohybovaly nad hodnotami zaznamenanými v základním měření. Během tepelného namáhání došlo k nárůstu vložného útlumu každého výstupu v průměru o 2 dB. Všechny výstupy překročily garantovanou hodnotu.

U vlnové délky 1550 nm byl nárůst vložného útlumu v porovnání s předchozí vlnovou délkou vyšší. I v tomto případě všechny výstupy překročily hodnotu udávanou v technické specifikaci. Během tepelného stárnutí došlo k nárůstu vložného útlumu v průměru o 8 dB. Z tohoto hlediska lze s jistotou říct, že tepelným namáháním dochází ke stárnutí vláken.

Celkové ztráty byly u nového coupleru velmi nízké. V průběhu tepelného stárnutí se jejich hodnota navýšila. U vlnové délky 1310 nm to bylo 2,6713 dB a pro 1550 nm 8,4649 dB. Srovnáním se základním měřením bylo zjištěno, že se útlumy průměrně zvýšily o 2,3409 dB (1310 nm) a o 8,0844 dB (1550 nm). Výsledné hodnoty tohoto parametru jsou značně vysoké, a proto lze konstatovat, že teplo negativně ovlivňuje tento parametr.

Dalším sledovaným parametrem byla homogenita ztrát. V porovnání s Optokonem zde bylo dosaženo lepších výsledků. V základním měření byl tento parametr roven 0,6988 dB pro 1310 nm a 0,7598 dB pro 1550 nm. Po tepelném namáhání došlo k nárůstu na hodnotu 1,3552 dB (1310 nm) a 2,4465 dB (1550 nm). Z toho je patrný nárůst (zhoršení) ztrát a lze tedy předpokládat, že příčinou je teplo.

Dělicí poměr je představitelem parametru, u kterého opět nelze s jistotou určit, jak je teplem ovlivňován. V základním měření bylo u 1310 nm šest výstupů v intervalu 12 až 13 %. Během tepelného stárnutí se tento počet snížil na čtyři výstupy. Teplo tedy nepříznivě působí na tento parametr.

U vlnové délky 1550 nm se v základním měření pohybovalo šest výstupů v požadovaném rozmezí. Po tepelném namáhání však bylo zjištěno, že ani jeden výstup již nelze do tohoto intervalu řadit. U této vlnové délky byl dopad tepelného namáhání znatelnější a opět negativní.

Posledním sledovaným parametrem byla směrovost, která v základním měření přesahovala garantovanou hodnotu pro obě vlnové délky. Ačkoliv tepelným stárnutím směrovost neklesla pod 55 dB, tak velmi často způsobilo pokles (zhoršení) oproti výchozímu měření. Z toho lze usoudit, negativní vliv tepla na směrovost.

Dle mého názoru, výsledná zjištění ovlivňují dva druhy faktorů, a to vnější a vnitřní. Mezi vnější faktory lze zařadit způsob sestavení coupleru neboli jeho celkovou stavbu. Již při prvním pohledu na oba couplery bylo možné zaznamenat jejich vzájemné rozdíly. Coupler firmy Optokon disponoval plechovým krytem a jeho vlákna byla charakteristická větší ochranou (viz obrázek 7.1). Naopak coupler firmy Gezhi měl pouze plastový obal a jeho vlákna měly menší ochranu. Tímto faktorem lze vysvětlit změny jednotlivých parametrů.

Vnitřními faktory je možné chápat použité materiály na výrobu vlákna. V kapitole 4 byl vysvětlen rozdíl mezi krystalickou a amorfní látkou. Krystalická látka má pravidelnou krystalickou mřížku a neobjevují se zde žádné změny. Amorfní látky nemají pravidelnou krystalickou mřížku a může u nich docházet k deformaci. Pokud tedy bylo pro vyhotovení coupleru využito pouze sklo bez příměsí, lze během tepelného namáhání zaznamenat deformaci, která se může projevit nehomogenitami a větším útlumem. Nicméně pokud by bylo pro vyhotovení použito sklo s křemennou příměsí (SiO_2), tak se jedná o krystalickou látku, u které by nemělo docházet k deformaci a případným útlumům. Vnitřní faktory jsou však pouze domněnkou, jelikož jim zde nebyl věnován prostor, a proto by se mohly stát předmětem zkoumání v další práci.

Použitá literatura

- [1] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA. *Optické přístupové sítě a přípojky FTTx*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05463-5
- [2] VENGHAUS, Herbert a Norbert GROTE, ed. *Fibre optic communication: key devices*. Berlin: Springer, c2012. ISBN 978-3-642-20516-3
- [3] DERICKSON, Dennis a kol. *Fiber optic test and measurement*. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, c1998. ISBN 0-13-534330-5
- [4] DUTTA, Achyut K., Niloy K. DUTTA a Masahiko FUJIWARA, ed. *WDM technologies*. Volume II, Passive optical components. San Diego: Academic Press, c2003. ISBN 0-12-225262-4
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, OBDRŽÁLEK, Jan a Petr DUB, ed. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Část 2, Mechanika - Termodynamika. Přeložil Jan OBDRŽÁLEK. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1868-0
- [6] DUBSKÝ, Pavel a Maciej KUCHARSKI. *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*. Praha: Mikrom, 1994.
- [7] LAFATA, P. a J. PETERKA. Rozvoj přípojek FTTx. *Elektrorevue*, 2010, vol. 12, no. 2, ISSN 1213-1539
- [8] LAFATA, P. Pasivní optické sítě WDM–PON. *Access server* [online]. 2009, roč. 16. [cit. 2018-03-05]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticke-site-wdm-pon&cisloclanku=2009050004>.
- [9] ARVAL, Ladislav. PON (Passive Optical Network). *NETGURU* [online]. 2011 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://www.netguru.cz/odborne-clanky/1340-pon-passive-optical-network1>
- [10] LAFATA, P. Pasivní optické sítě s rychlostí 10 Gbit/s. *Access server* [online]. 2011, roč. 16. [cit. 2018-03-08]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticke-site-s-rychlosti-10-gbits&cisloclanku=2011030001>.
- [11] LAFATA, P. Pasivní optická přístupová síť EPON. *Access server* [online]. 2009, roč. 16. [cit. 2018-03-10]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticka-pristupova-sit-epon&cisloclanku=2009050003>.
- [12] LAFATA, P. Pasivní optická síť GPON. *Access server* [online]. 2009, roč. 16. [cit. 2018-03-10]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticka-sit-gpon&cisloclanku=2009050002>
- [13] LAFATA, P. Útlumová bilance pasivních optických přístupových sítí. *Access server* [online]. 2009, roč. 16. [cit. 2018-03-12]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=utlumova-bilance-pasivnich-optickych-pristupovych-siti&cisloclanku=2009060002>.
- [14] BEDNÁREK, Lukáš a kol. The ageing process of optical couplers by gamma irradiation. *Proceedings of SPIE – The international Society for Optical Engineering*. 2015, vol. 9586, p. 1–10. ISBN 978-1-62841-752-4

- [15] BEDNÁREK, Lukáš a kol. The influence of thermal aging on the optical coupler. *Proceedings of SPIE – The international Society for Optical Engineering*. 2016, vol. 9958. ISBN 978-1-5106-0307-3
- [16] KAŠÍK, Ivan a Pavel PETERKA. Optická vlákna – páteř moderních komunikací. *Československý časopis pro fyziku*. 2011, vol. 61, no. 1, p. 4–7. ISSN 0009-0700
- [17] VARIANT plus. *Strukturovaný kabelážní systém, optická kabeláž – příručka* [online]. 2015, [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: https://www.variant.cz/soubory-ve-skladu/Karty/Spol_Zarazene/01-MANU%C3%81LY%20CS/SKS%20prirucka%20optika%20-%20man-a4.pdf
- [18] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika* [online]. 2015 [cit. 2018-03-12] Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/Impresum.html>.
- [19] GEZHI PHOTONICS. *PLC Splitter Module* [online]. 2015 [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: <http://www.gezhiphotonics.com/plc-splitter-module.html>
- [20] OPTOKON. *SFT-Sxx-01xN singlemodové couplery* [online]. 2011 [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: http://www.optokon.cz/sites/default/files/cpl_08-02_en-sft-s35-01xn.pdf
- [21] ISO. *ISO/IEC 14763-3:2014* [online]. 2014 [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/52470.html>
- [22] VAŠINEK, Vladimír *Optické komunikace 1 pro integrovanou výuku*. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3675-1
- [23] SODOMKA, Jaromír. *Nauka o materiálu* [online]. 2006 [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz/personal/sodomjar/nauka%20o%20materialu.pdf>
- [24] E-KONSTRUKTER. *Jaký je rozdíl mezi přenosem tepla vedením, prouděním a sáláním?* [online]. 2015 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-prenosem-tepla-vedenim-proudenim-a-salanim>
- [25] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie Fyziky* [online]. 2018 [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [26] LÁTAL, Jan a Petr KOUDELKA *Měření v PON* [online]. 2011 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18132506-Fakulta-elektrotechniky-a-informatiky-vs-b-tu-ostrava-mereni-v-pon.html>

Seznam příloh

Přílohy jsou součástí přiloženého CD.

Příloha č. 1: 0. měření – základní měření

Příloha č. 2: 1. měření

Příloha č. 3: 2. měření

Příloha č. 4: 3. měření

Příloha č. 5: 4. měření

Příloha č. 6: 5. měření

Příloha č. 7: 6. měření

Příloha č. 8: 7. měření

Příloha č. 9: 8. měření

Příloha č. 10: 9. měření

Příloha č. 11: 10. měření

Příloha č. 12: 11. měření

Příloha č. 13: 12. měření

Příloha č. 14: 13. měření

Příloha č. 15: 14. měření

Příloha č. 16: 15. měření

Příloha č. 17: 16. měření

Příloha č. 18: 17. měření

Příloha č. 19: 18. měření

Příloha č. 20: 19. měření

Příloha č. 21: 20. měření

Příloha č. 22: 21. měření

Příloha č. 23: 22. měření

Příloha č. 24: 23. měření

Příloha č. 25: 24. měření

Příloha č. 26: 25. měření

Příloha č. 27: 26. měření

Příloha č. 28: 27. měření

Příloha č. 29: 28. měření

Příloha č. 30: 29. měření

Příloha č. 31: 30. měření
Příloha č. 32: 31. měření
Příloha č. 33: 32. měření
Příloha č. 34: 33. měření
Příloha č. 35: 34. měření
Příloha č. 36: 35. měření
Příloha č. 37: 36. měření
Příloha č. 38: 37. měření
Příloha č. 39: 38. měření
Příloha č. 40: 39. měření
Příloha č. 41: 40. měření
Příloha č. 42: 41. měření
Příloha č. 43: 42. měření
Příloha č. 44: 43. měření
Příloha č. 45: 44. měření
Příloha č. 46: 45. měření
Příloha č. 47: 46. měření
Příloha č. 48: 47. měření
Příloha č. 49: 48. měření
Příloha č. 50: 49. měření
Příloha č. 51: 50. měření
Příloha č. 52: 51. měření
Příloha č. 53: 52. měření
Příloha č. 54: 53. měření
Příloha č. 55: 54. měření
Příloha č. 56: 55. měření
Příloha č. 57: 56. měření
Příloha č. 58: 57. měření
Příloha č. 59: 58. měření
Příloha č. 60: 59. měření
Příloha č. 61: 60. měření
Příloha č. 62: 61. měření
Příloha č. 63: 62. měření

Příloha č. 64: 63. měření

Příloha č. 65: 64. měření

Příloha č. 66: 65. měření

Příloha č. 67: 66. měření

Příloha č. 68: 67. měření

Příloha č. 69: 68. měření

Příloha č. 70: 69. měření

